ORSAY
Série A,
N° d'ordre : 901

THÈSES

PRÉSENTÉES

A L'UNIVERSITÉ DE PARIS-SUD

CENTRE D'ORSAY

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

Jean, Marie, Maurice LEVASSEUR

1re THÈSE

Etude de l'intersection des macles mécaniques dans le fer alpha

Application à l'initiation et à la propagation d'une fissure de clivage

2e THÈSE

Propositions données par la Faculté

Soutenues le 25 février 1972 devant la Commission d'examen

MM. J. FRIEDEL — Président
J. PHILIBERT, G. SAADA — Examinateurs

ÉDITIONS MÉTAUX - 32, rue du Maréchal-Joffre - 78100 Saint-Germain-en-Laye

THÈSES

PRÉSENTÉES

A L'UNIVERSITÉ DE PARIS-SUD

CENTRE D'ORSAY

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

Jean, Marie, Maurice LEVASSEUR

1re THÈSE

Etude de l'intersection des macles mécaniques dans le fer alpha

Application à l'initiation et à la propagation d'une fissure de clivage

2e THÈSE

Propositions données par la Faculté

Soutenues le 25 février 1972 devant la Commission d'examen

MM. J. FRIEDEL Président

J. PHILIBERT, G. SAADA } Examinateurs

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

AVANT-PROPOS

Ce travail a été effectué dans les laboratoires de l'Institut de Recherches de la Sidérurgie Française de Saint-Germain-en-Laye. Je tiens à en remercier la Direction pour les conditions de travail qu'elle m'a accordées.

A M. le Professeur J. FRIEDEL, qui a bien voulu s'intéresser à cette étude et la patronner, j'exprime ma profonde et respectueuse gratitude.

Je tiens tout particulièrement à assurer de toute ma reconnaissance MM. les Professeurs J. PHILIBERT et G. SAADA. Ils savent combien leurs encouragements, leurs conseils et leur aide m'ont été précieux tout au long de cette étude.

Je remercie vivement M. le Professeur A. SLEESWYK, de l'Université de Gröningen, qui s'est toujours intéressé à ce travail.

Je suis heureux d'exprimer mes vifs remerciements à M. G. POMEY, qui, comme Chef du Groupe Métallurgie Physique, m'a constamment soutenu dans cette recherche.

MM. D. CUCHEVAL, C. LORIDAN et B. THOMAS savent la part qu'ils ont prise à cette étude et la dette de reconnaissance que j'ai contractée envers eux. Je les remercie ici sincèrement. Ce fut toujours une joie de travailler ensemble et je pense avoir, à cette occasion, noué avec eux les liens d'une amitié sincère.

Je voudrais aussi remercier tous les collègues de l'IRSID qui, à des titres divers, m'ont apporté une aide efficace. Qu'il me soit permis de citer MM. M. BLANADET, J. BOURGEOT, A. CAREL, G. FAIVRE, G. HENRY et L. ROESCH et tout particulièrement Mme C. CRÉTIN qui a eu l'entière responsabilité de la mise en forme et de l'édition de ce texte.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41534912_0019

SOMMAIRE

CHAPITRE I

SITUATION DU PROBLEME

I. Introduction.

II. Mécanismes d'initiation du clivage à base de dislocations.
- A. Empilement simple. Modèle de Zener.
- B. Empilement double. Modèle de Cottrell.
- C. Critique de ces modèles.

III. Mécanismes à base de macles mécaniques.

IV. Plan de l'étude.

CHAPITRE II

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I. Généralités.

II. Modèles globaux : Cahn-Liu.

III. Modèle analytique : Sleeswyk.
- A. Principe général.
- B. Les dislocations émissaires.
- C. Incorporation d'une dislocation parfaite dans un joint d'épitaxie.
- D. Incorporation d'une dislocation parfaite dans un joint de macle cohérent.

IV. Résultats dans les structures hexagonale et cubique à faces centrées.
- A. Structure hexagonale.
- B. Structure cubique à faces centrées.
- C. Conclusion des études dans ces deux structures.

V. Résultats relatifs à la structure cubique centrée.
- A. Travaux sur les martensites.
- B. Travaux sur le clivage.

CHAPITRE III

HYPOTHESES GEOMETRIQUES DIFFERENTS TYPES D'INCORPORATION

I. Introduction.

II. Conservation du cisaillement.

III. Nature des plans de relaxation.

IV. Etat de la macle obstacle au moment du croisement.

V. Conséquences : les différents types d'intersection.
- A. Géométrie de l'intersection.
- B. Réaction d'incorporation des différentes familles.

CHAPITRE IV

METHODES EXPERIMENTALES

I. Introduction.

II. Fabrication des monocristaux.

III. Observations en microscopie optique.
- A. Préparation des éprouvettes.
- B. Problèmes d'orientation.
- C. Détermination de la nature des intersections.
- D. Critique des observations.

IV. Observations en microscopie électronique.
- A. Préparation des éprouvettes.
- B. Problèmes d'orientation :
  - *a*) Système de référence pour le tracé de la projection stéréographique;
  - *b*) Détermination de l'orientation de la matrice et des macles à partir des taches [110].
- C. Détermination de la nature des intersections.

V. Réflexions et coupes remarquables.
- A. Les réflexions :
  - *a*) Les réflexions communes à deux macles quelconques;
  - *b*) Extinction spécifique des dislocations émissaires.
- B. Les coupes :
  - *a*) Coupe {111}.
  - *b*) Les symétries remarquables.
  - *c*) Exemple : coupes {113} superposées.

CHAPITRE V

RESULTATS EXPERIMENTAUX

I. Le croisement de type [111].

II. Le croisement de type [210].
- A. Avec relaxation dans le plan de la macle sedaire :
  - *a*) Microscopie électronique;
  - *b*) Microscopie optique.

B. Avec glissement sur le plan $\{100\}_T$:
a) Microscopie électronique.
b) Microscopie optique.
C. Résumé des résultats.
III. Le croisement de type [113].
A. Microscopie électronique.
B. Microscopie optique.
C. Résumé des résultats.
IV. Le croisement de type [110].
V. Interaction dislocations-macles.
VI. Interaction macles-joints de grains.

CHAPITRE VI

INTERPRETATION. DISCUSSION

I. Introduction.
II. Le croisement de type [111].
III. Généralités sur les autres types de croisement.
IV. Le croisement de type [210].
A. Avec relaxation sur le plan $\{100\}_{Tr}$
B. Avec relaxation sur le plan de la macle secondaire.
V. Le croisement [113].
A. Avec formation de la macle image.
B. Incorporation dissymétrique.
VI. Le croisement [110].
A. Sans relaxation dans la matrice.
B. Avec relaxation dans la matrice.
VII. Interaction macles-dislocations.
VIII. Conclusions générales.
A. Les plans de relaxation contiennent l'axe d'intersection.
B. Les réactions font intervenir des dislocations [100]. Le glissement peut avoir lieu sous cette forme.
C. Le cisaillement se conserve.

CHAPITRE VII

APPLICATION A LA RUPTURE PAR CLIVAGE
CONCLUSIONS

I. Apparition de la dislocation de Cottrell, $b = [100]$.
II. Application à l'initiation du clivage.
III. Application. Interaction macles-joint de grain. Propagation du clivage.
IV. Conclusions.

ANNEXE A

CRISTALLOGRAPHIE DU MACLAGE

ANNEXE B

LES DIFFERENTS TYPES D'INTERSECTION

ANNEXE C

LES DIFFERENTS TYPES D'INCORPORATION

I. Analytiquement.
A. Matrice de transformation.
B. Propriétés de la transformation.
C. Incorporation des dislocations parfaites dans la macle (112).
II. Géométriquement.

ANNEXE D

NATURE DES DISLOCATIONS PARTIELLES
LAISSEES A L'INCORPORATION

I. Cisaillement produit par les macles.
II. Intersection avec un vecteur de la famille B.
III. Intersection avec un vecteur de la famille C.

ANNEXE E

PROJECTION STEREOGRAPHIQUE
DE LA MACLE

I. Tracé de la projection stéréographique de la macle.
II. Indexation de la projection stéréographique de la macle.

BIBLIOGRAPHIE.

Etude de l'intersection des macles mécaniques dans le fer alpha

Application à l'initiation et à la propagation d'une fissure de clivage

par **Jean LEVASSEUR**

CHAPITRE I

Situation du problème

I. — INTRODUCTION

A basse température les matériaux de structure cubique centrée subissent une transition du comportement ductile au comportement fragile. Cette transition a une extrême importance tant du point de vue industriel (elle limite impérativement le domaine d'utilisation du matériau considéré) que du point de vue théorique. Aussi y a-t-on consacré un nombre d'études considérable.

Cette fragilité de basse température se traduit le plus souvent par l'apparition du maclage et du clivage. La fragilité ne peut pas être ramenée à ces deux seuls phénomènes, mais ils en sont la manifestation la plus fréquente. Ce sont les seuls que nous étudierons ici. Ils ont l'avantage d'être parfaitement définis.

L'importance que peuvent avoir les croisements des macles dans la rupture par clivage est depuis longtemps reconnue. Pourtant la plupart des modèles théoriques proposés pour le clivage sont à base de dislocations. Nous allons les exposer rapidement et voir quelles sont leurs limites. Ceci nous amènera naturellement à cette étude : quel est le rôle exact des croisements de macle dans l'initiation de la rupture par clivage ? Pour répondre à cette question nous serons amenés à examiner en détail les mécanismes de croisement de macles et les contraintes engendrées.

II. — MECANISMES D'INITIATION DU CLIVAGE A BASE DE DISLOCATIONS

Eshelby et al. ont montré comment un empilement de dislocations peut jouer le rôle de concentrateur de contraintes [1]. Un calcul simple permet d'évaluer que la contrainte en

tête d'un empilement de n dislocations est égale à n fois la contrainte macroscopique appliquée sur le plan de glissement par la force extérieure [2]. Les modèles d'initiation du clivage vont tous utiliser cette propriété. Ils se distinguent essentiellement par la nature de l'obstacle sur lequel s'empilent les dislocations (fig. I.1.).

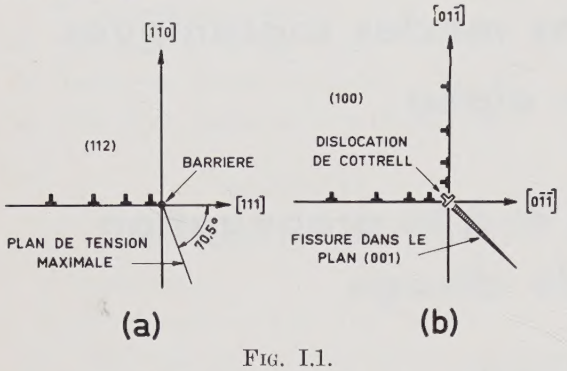


FIG. I.1.

Modèles d'initiation du clivage dans les c. c.
a) Zener - *b*) Cottrell

A - Empilement simple : modèle de Zener [3]

Les dislocations s'empilent sur un obstacle quelconque : inclusion, joint de grain, sous-joint, macle mécanique, etc. Le calcul montre qu'il faut environ 500 dislocations pour atteindre la contrainte critique de clivage [4].

B - Empilement double : modèle de Cottrell [5]

La dislocation de vecteur de Bürgers $b = a$ [100] se forme par réaction de deux dislocations parfaites 1/2 [111] à l'intersection de leurs plans de glissement. Le calcul montre qu'il faut empiler environ 50 dislocations dans chaque plan pour atteindre la contrainte théorique de clivage [6].

C - Critique de ces modèles

Ces modèles ont été raffinés : on a envisagé le cas où les empilements se font sur plusieurs plans adjacents (ce qui permet de réduire d'autant la dimension des empilements dans chaque plan [7]) et même le cas où les dislocations sont réparties dans une bande de glissement [8].

Tous ces modèles se heurtent à de sérieuses objections :

— La dislocation de Cottrell $b = a$ [100] qui doit stabiliser l'empilement n'a jamais été mise en évidence.

— Il ne semble pas qu'il existe d'obstacle statique assez stable pour contenir l'empilement qui doit initier la fissure de clivage. Les lignes de glissement « franchissent » les joints de grain dès la limite élastique [9], à fortiori les sous-joints ou les joints de macle cohérents. Terasaki a montré que la barrière de Cottrell doit se rédécomposer sous l'effet de la contrainte qu'elle est censée contenir [7].

Enfin, tous ces modèles négligent l'aspect dynamique qui joue un rôle important. Ce dernier point a été souligné dans deux articles récents [10, 11].

III. — MÉCANISMES A BASE DE MACLES MÉCANIQUES

Les zones de croisements de macles sont des zones à forte contrainte et à forte déformation : elles peuvent servir de germes à la recristallisation ultérieure du métal déformé (fig. I.2.) [12, 13]. L'idée que ces contraintes suffisent à provoquer le clivage a été émise depuis longtemps. Des preuves convaincantes de l'efficacité du croisement des macles pour initier le clivage ont été publiées. Mais, comme nous le verrons dans le chapitre suivant, aucune étude exhaustive n'avait jusqu'à présent

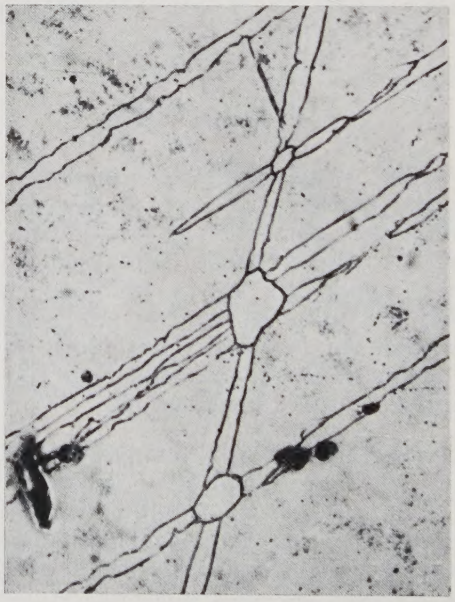


FIG. I.2. × 450

Microscopie optique.
La zone d'intersection, très déformée, sert de germe à la recristallisation.

été consacrée au croisement des macles. C'est ce qui nous a amenés à considérer ce problème, notre but étant de déterminer si et, éventuellement, comment les croisements de macles peuvent provoquer la rupture par clivage.

IV. — PLAN DE L'ÉTUDE

Dans le chapitre II nous présenterons une revue bibliographique des études consacrées aux croisements des macles. Le problème a été abordé pour deux raisons : d'une part, parce que ces croisements semblent jouer un rôle essentiel dans la rupture de clivage; d'autre part, parce que la déformation plastique des martensites qui se sont maclées au cours de leur formation pose le problème de l'interaction de ces macles avec tous les autres modes de déformation. Dans le chapitre III nous exposerons les hypothèses géométriques de l'étude. Le chapitre IV donne les détails des méthodes expérimentales employées. Les chapitres V et VI sont consacrés respectivement à l'exposé et à la discussion des résultats expérimentaux. Enfin, le chapitre VII apporte la conclusion de l'étude : application des résultats obtenus à la rupture par clivage et examen des problèmes encore à résoudre.

CHAPITRE II

Revue bibliographique

I. — GÉNÉRALITÉS

Les macles mécaniques qui ont fréquemment plusieurs microns d'épaisseur engendrent un cisaillement très concentré. Il se pose un problème dès que ces macles viennent buter sur un obstacle : ou bien le cisaillement se conserve — il peut alors apparaître tous les modes de relaxation possibles : macles, glissement, pliage, etc. — ou bien il ne se conserve pas. Il faut alors introduire au niveau de l'obstacle des discontinuités cristallographiques, c'est-à-dire soit des fissures, soit des dislocations. Comme nous allons le voir, tous les modèles d'intersection de macles posent, au moins implicitement, l'hypothèse simplificatrice que le cisaillement se conserve. Nous reviendrons sur ce point au chapitre III quand nous présenterons nos hypothèses.

Il existe deux modèles pour décrire ces intersections : l'un, global, a été proposé par Cahn [14], l'autre, plus analytique, a été développé par Sleeswyk. Leur différence tient essentiellement au fait suivant : le modèle de Cahn fait explicitement intervenir le mécanisme d'intersection. La conservation du cisaillement se fait par apparition d'une macle secondaire dans la macle obstacle. Tout autre mode de transmission du cisaillement est exclu. Au contraire, le modèle de Sleeswyk ne suppose aucune restriction sur les modes de relaxation possibles. Il peut y en avoir simultanément plusieurs et de diverses sortes (par exemple maclage et glissements combinés).

La méthode proposée par Sleeswyk est la plus générale. Bien qu'elle ait été décrite dans le cas des matériaux de structure cubique centrée, elle a été appliquée avec succès au cas des matériaux de structure cubique à face centrée et hexagonale. Nous résumerons les résultats obtenus dans ces structures et nous verrons quels enseignements on peut en tirer pour formuler les hypothèses du chapitre III. Enfin, nous examinerons les résultats publiés sur le croisement des macles mécaniques dans la structure cubique centrée.

II. — MODÈLES GLOBAUX : CAHN-LIU

Le premier modèle a été proposé par Cahn [14] dans un article sur la déformation de l'uranium. Il repose sur les deux hypothèses suivantes :

1) Il y a conservation du cisaillement.

2) Le croisement ne peut se faire que par la création d'une macle secondaire dans la macle obstacle.

On en déduit les règles nécessaires et suffisantes pour que le croisement soit possible.

1) Les plans de macle incidente et secondaire doivent avoir leur direction d'intersection dans le plan de macle obstacle.

2) Les macles incidente et secondaire doivent avoir la même direction de cisaillement η_1 et le même cisaillement s (la définition de ces notations classiques dues à Cahn [14] est rappelée à l'annexe A).

Partant de ces conditions Liu a montré qu'on peut distinguer deux types d'intersection [15] :

1) Les plans des macles incidente et secondaire sont différents. Il faut alors que le vecteur de cisaillement commun soit parallèle à la direction commune aux deux macles (donc également parallèle au plan de la macle obstacle). Dans ce cas la macle incidente apparaît déviée par la macle obstacle (fig. II.1. A).

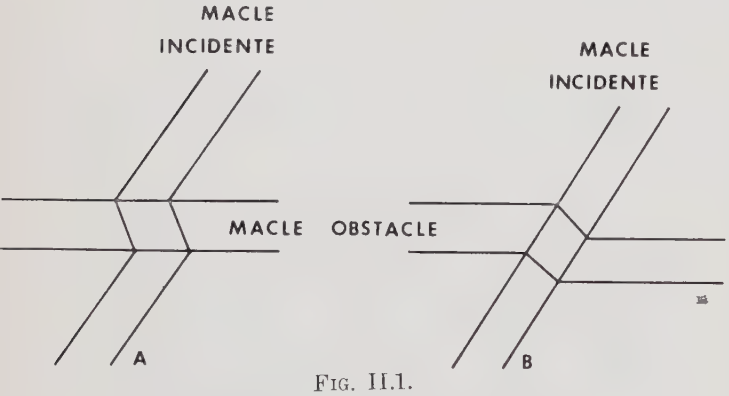


FIG. II.1.

Morphologies possibles de croisements, d'après Cahn et Liu.

2) Les plans des macles incidente et secondaire sont confondus. Le vecteur de cisaillement peut alors être une direction quelconque de ce plan. Dans ce cas c'est la macle obstacle qui apparaît cisaillée par la macle incidente (fig. II.1. B).

Reed-Hill [16] a souligné justement que les hypothèses de Cahn sont beaucoup trop restrictives. Quand deux macles se croisent, on peut accommoder la déformation par tout autre mécanisme que le maclage simple : glissement, maclage multiple, pliage, fissuration. Il a ainsi montré que le croisement de deux macles peut avoir lieu dans des conditions non prévues par Cahn. On observe alors souvent des relaxations très intenses, essentiellement par glissement.

III. — MODÈLE ANALYTIQUE : SLEESWYK

A - Principe général

Le modèle de Cahn traitait globalement l'ensemble du cisaillement. Dans le modèle qui va suivre au contraire on analyse le cisaillement provoqué par la macle et on le décrit d'une manière qui permet de faire intervenir des modes de relaxation autres que la formation d'une macle secondaire. Le modèle repose essentiellement sur deux idées :

1) Le maclage est un cisaillement. Il peut donc être globalement décrit à l'aide de dislocations (voir annexe A).

2) Une dislocation peut glisser d'un cristal A à un cristal B ayant avec A des relations d'épitaxie.

On voit donc la méthode d'analyse du problème : on décrit les macles à l'aide de dislocations dont on analysera l'incorporation dans les macles mécaniques.

B - Les dislocations émissaires

Quelle que soit la structure, la formation d'une macle peut être décrite à peu près exactement à l'aide de dislocations partielles. Nous n'allons traiter en détail que le cas des matériaux de structure cubique centrée (où la description du cisaillement par des dislocations est rigoureuse. Voir annexe A).

Dans cette structure les macles apparaissent sur les plans {112}, elles peuvent se décrire à l'aide de la propagation d'une dislocation partielle (ou dislocation de macle) dans chaque plan {112}.

Si une macle se trouve bloquée par un obstacle quelconque, il apparaît en tête de macle un joint incohérent formé de dislo-

FIG. II.2.

Réaction permettant de stabiliser un joint de macle incohérent (Sleeswyk).

cations partielles. Sleeswyk a fait remarquer qu'un joint qui serait formé uniquement de dislocations 1/6 [111] aurait une très grande énergie [17]. Il a donc imaginé la réaction schématisée sur la figure II.2. Après réaction les trois partielles qui bordent la macle ont une somme de vecteur de Bürgers nulle et la dislocation parfaite peut poursuivre son glissement. Le joint de macle incohérent ainsi formé a une énergie plus basse et les contraintes qu'il engendre à grande distance sont nulles.

Sleeswyk a poussé plus loin son hypothèse et a suggéré que la propagation des macles se faisait sous la forme de dislocations parfaites précédant les groupes de trois partielles de basse énergie. Il a ainsi interprété le fait que les macles peuvent s'arrêter au cours de leur propagation. Sleeswyk a appelé la dislocation parfaite, qui précède le joint incohérent et donne tout le cisaillement, une dislocation émissaire.

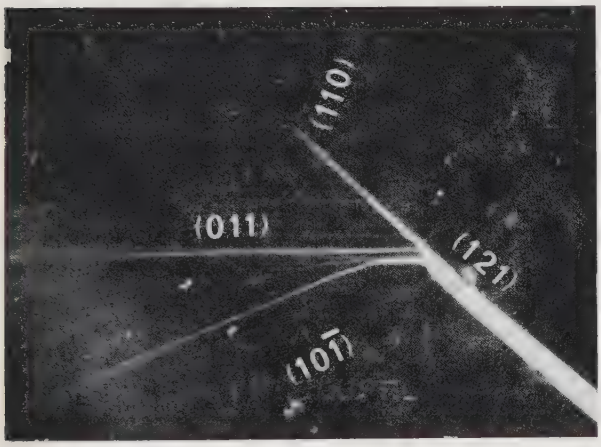


FIG. II.3. × 600

Microscopie optique.

La macle étant bloquée, les dislocations émissaires ont glissé sur les trois plans {110} possibles.

Votava et Sleeswyk ont fait quelques observations pour étayer cette théorie [18]. Elles sont du type présenté sur la figure II.3. Une macle a été bloquée et on observe une importante relaxation par glissement. Leur analyse met en évidence que les trois plans {110} qui contiennent la direction de cisaillement [111] de la macle bloquée ont été actifs. Mais cette observation ne prouve pas l'existence des dislocations émissaires, telles que Sleeswyk les a décrites de façon définitive : elle montre seulement qu'il y a en tête d'une macle bloquée des sources actives de dislocations dont le vecteur de Bürgers est celui qu'auraient les dislocations émissaires. Cette configuration est assez fréquente au voisinage des clivages. Il s'agit vraisemblablement d'une macle qui était en progression au moment de la rupture. Elle a cessé de croître quand la contrainte est devenue nulle au moment du clivage. Les glissements observés ont servi à relaxer les contraintes qui apparaissent en tête de macle.

C - Incorporation d'une dislocation parfaite dans un joint d'épitaxie

Friedel [19] a montré qu'une dislocation parfaite peut s'incorporer dans un grain ayant avec le premier des relations d'épitaxie selon la réaction $B_1 \rightarrow B_e + B_2$. La dislocation de vecteur de Burgers B_1 engendre B_2 dans le grain voisin et laisse à l'interface une dislocation B_e égale à la différence entre les deux parfaites.

Saada [20] propose une autre manière d'écrire la réaction : $B_1 \rightarrow B_1 + B_2 - B_2$, qui a l'avantage de ne faire intervenir que des dislocations parfaites. Le groupe $B_1 - B_2$ est évidemment équivalent à la dislocation B_e introduite ci-dessus. Selon ce mécanisme on laisse à l'interface un quasi dipôle formé des dislocations B_1 et $-B_2$, cependant que B_2 continue son glissement dans le grain voisin. Si plusieurs réactions de ce genre se produisent au même endroit, on peut minimiser l'énergie de la paroi de dislocations formée en combinant les diverses dislocations laissées à l'interface. Ceci est rendu possible par des glissements ou des montées sur de très courtes distances. On peut, en principe, s'arranger pour que la somme des vecteurs de Bürgers laissés soit toujours inférieure à la longueur d'une période entière du réseau de l'un ou l'autre grain.

D. - Incorporation d'une dislocation parfaite dans un joint de macle cohérent

Un joint de macle cohérent est un cas particulier du joint d'épitaxie. Dans le cas de la structure cubique centrée, les relations d'orientation entre la matrice et la macle sont telles que la réaction d'incorporation ne fait intervenir que des dislocations entières de la matrice ou de la macle et, éventuellement, les dislocations partielles associées à la formation de la macle obstacle. Saxl [21] a étendu ces résultats en faisant une analyse générale appli-

cable à l'ensemble des dislocations dans l'ensemble des structures.

Le cas de la structure cubique centrée a été étudié en détail par Sleeswyk et Verbraak [22]. On peut distinguer deux grandes catégories d'incorporation.

1) La dislocation incidente a son vecteur de Bürgers parallèle au vecteur de cisaillement η_1 de la macle. Le cisaillement peut s'incorporer sans difficulté car le vecteur de Bürgers de la dislocation incidente est un vecteur de Bürgers possible dans la matrice et dans la macle. Il n'apparaît pas de dislocation à laisser sur le plan de macle car, après le passage de la dislocation, le joint de macle cohérent n'est pas cisaillé.

2) Dans les autres cas le vecteur de Bürgers de la parfaite incidente n'est pas parallèle au plan de macle obstacle. Après la traversée, le joint de macle cohérent apparaît cisaillé. On doit alors laisser à l'incorporation les partielles nécessaires pour border les fautes formées. Nous étudierons en détail toutes les réactions possibles dans le chapitre III.

Sleeswyk et Helle [23] ont appliqué cette méthode pour interpréter une configuration particulière d'intersection de macles. Mais, comme nous allons le voir, une exploitation systématique de la méthode n'a été entreprise que sur les structures cubique à faces centrées et hexagonale.

IV. — RÉSULTATS DANS LES STRUCTURES HEXAGONALE ET CUBIQUE A FACES CENTRÉES

A - Structure hexagonale

Dans ces structures le maclage est un élément de déformation essentiel. Il est donc important de connaître l'interaction macles-dislocations afin de déterminer quel rôle peut jouer le maclage dans le durcissement. Comme nous venons de le voir, l'interaction des macles peut s'analyser avec le même formalisme que l'interaction macles-dislocations.

Quelques observations sur la morphologie du croisement des macles ont été publiées : dans le zinc par Pratt [24], dans le zirconium par Reed-Hill et Buchanan [25], etc. L'ensemble de ces résultats a été résumé par Reed-Hill [16] dans un article qui conclut que les conditions de croisement proposées par Cahn [14], sont beaucoup trop restrictives. Le croisement est souvent observé alors qu'il devrait être impossible d'après cette théorie.

Des travaux plus récents portent sur l'interaction dislocation-macle : comme dans la théorie « analytique » les macles sont décrites par des dislocations. Mais aucune dislocation ne peut décrire exactement le maclage : il faut, après le passage de la dislocation partielle, rajuster la position de quelques atomes : c'est le « shuffling ». On tourne la difficulté en introduisant la notion de dislocation de zone : ces dislocations représentent le cisaillement global entre deux plans de coïncidence. Cette notion, introduite par Thompson et Millard [26] et par Westlake [27] alimente encore des discussions : Mendelson [28], Yoo [29].

Les observations sur l'interaction macle-dislocation ont été faites essentiellement dans le zinc par Yoo et Wei [30], dans l'étain β par Ishii et Kiho [31] en microscopie optique et par Tomsett et Bevis dans le zinc [32] en microscopie électronique. Les résultats sont interprétés à l'aide d'une théorie publiée par Yoo [33] calquée sur celle de Sleeswyk.

B - Structure cubique à faces centrées

Deux études récentes ont été consacrées à l'interaction des macles dans cette structure. Saito [34] a étudié en microscopie électronique le croisement des macles et l'interaction macle-glissement dans du cuivre à 4 % de titane. Il a pu mettre en évidence la formation d'une macle secondaire dans la macle obstacle. Il a également interprété l'aspect « fragmenté » de certaines macles minces par le cisaillement qu'elles subissent quand elles sont traversées par des dislocations. Mahajan et al. [35] ont étudié la relaxation produite par une fine macle de déformation qui vient buter sur un joint de macle de recristallisation dans le cuivre. L'étude, en microscopie électronique, n'a pas permis de mettre en évidence la formation d'une macle secondaire. La relaxation s'effectue uniquement par glissement. Les vecteurs de Bürgers de ces dislocations ont été

déterminés. Ces deux expériences s'interprètent facilement à l'aide d'une théorie semblable à celle de Sleeswyk. Ici encore aucun des croisements de macles observés ne satisfait les conditions de Cahn.

C - Conclusions des études dans ces deux structures

De toutes ces études on peut tirer des enseignements généraux :

1) Les réactions observées peuvent toujours s'interpréter dans le cadre d'une théorie calquée sur celle de Sleeswyk.

2) Elles entraînent souvent une forte augmentation de l'énergie de ligne.

3) Les réactions qui se produisent ne sont que rarement celles qui demandent la création d'un minimum d'énergie de ligne.

4) Le choix de la réaction d'incorporation semble dépendre beaucoup de l'orientation de la direction de traction. Ce point a surtout été développé récemment par Vallance et Bevis [36].

5) Une macle secondaire peut apparaître en dehors des conditions d'intersection décrites par Cahn.

V. — RÉSULTATS RELATIFS A LA STRUCTURE CUBIQUE CENTRÉE

Il existe essentiellement deux raisons pour lesquelles l'étude de l'interaction des macles avec les autres modes de glissement revêt une importance particulière pour cette structure.

1) Les matériaux de structure cubique centrée présentent une fragilité à basse température. Le maclage est associé à cette fragilité. On a pu montrer que le croisement des macles engendre des contraintes locales si fortes qu'elles peuvent entraîner la rupture par clivage. De très nombreuses études ont été consacrées à ce problème.

2) Les martensites ont souvent une structure maclée. Ces macles apparaissent lors de la formation de la martensite pour accommoder les déformations. La déformation plastique ultérieure de ces martensites va immédiatement poser le problème de l'interaction de ces macles d'accommodation, avec les autres modes de déformation : glissement ou même maclage.

Tous les travaux publiés actuellement se réfèrent au travail original de Sleeswyk et Verbraak [22]. Sleeswyk a lui-même publié quelques travaux supplémentaires sur la morphologie des macles et sur les croisements eux-mêmes, modèle de l'initiation du clivage [37], modèle de grossissement des macles dû aux réactions d'intersection [38], modèle expliquant les indentations dans les macles [39], etc.

A - Travaux sur les martensites

La majorité des études sur l'observation fine des mécanismes de croisement a été effectuée sur les martensites. Malheureusement les structures de ces martensites sont extrêmement complexes, la densité de dislocations y est très forte. Il est donc difficile d'y mettre en évidence les relaxations dues aux contraintes induites par les croisements. Citons d'abord deux travaux en microscopie optique : Richman [40] pense mettre en évidence le démaclage dans le cas des intersections prévues par la théorie de Cahn [14]. Pogrebnoy [41] montre un phénomène de « réflexion » des macles incidentes sur les macles obstacles. (Le même phénomène a été mis en évidence et interprété par Terasaki [7] dans le cas des bandes de glissement. Il s'agit de réactions type Sleeswyk qui se produisent sur le plan de macle cohérent entre les dislocations incidentes et les dislocations partielles de la macle obstacle.)

Des études plus fouillées ont été menées en microscopie électronique : Chilton et Kelly montrent un aspect en zig zag d'une dislocation dans une martensite très finement maclée [42]. Ils interprètent cette déviation dans la macle par un mécanisme de Sleeswyk. Dans la macle, le vecteur de Bürgers change, donc, également, le plan de glissement. Le facteur de Schmid de la dislocation dans la macle n'est pas égal à celui de la dislocation correspondante dans la matrice. Il y a là l'origine d'un durcissement « géométrique » étudié par Kelly et Pollard [43]. Krauss et Pitsch [44] montrent des exemples de croisement complet non prévus par la théorie de Cahn mais ne proposent aucune interprétation. Plus récemment Kounicky [45] présente plusieurs types de croisement : l'un d'eux se fait selon l'axe [111] *

* Les différents types d'intersection sont identifiés par les indices cristallographiques de l'axe d'intersection des deux plans {112} des macles sécantes. Voir annexe B.

donc dans des conditions qui rendent le croisement possible selon Cahn. Mais les conclusions de cette théorie ne sont pas vérifiées car la partie commune aux deux macles ne se « démacle » pas. Le modèle de Sleeswyk ne s'applique pas non plus, car on observe une variation nette d'épaisseur des deux macles au niveau du croisement. Kounicky montre également quelques exemples de croisements complets d'autres types mais ne propose aucun mécanisme. Enfin, Bevis, Rowlands et al. exposent les différentes théories possibles du croisement [46] et observent un croisement qu'ils interprètent avec le modèle de Liu en faisant intervenir un mode de maclage inhabituel dans la martensite [47, 48] : la macle {112} se poursuit dans la macle obstacle selon une macle {5, 8, 11}.

Nous avons en vain essayé d'exploiter les résultats des différentes publications. Nous verrons plus loin que l'interprétation des clichés n'est aisée que si on les prend avec des orientations bien choisies. Les auteurs ne donnent en général qu'un cliché par intersection. L'orientation en est le plus souvent défavorable. Les observations publiées sont donc insuffisantes pour être exploitables.

B - Travaux sur le clivage

Dans une autre série de travaux les croisements de macle sont étudiés pour leur influence sur l'initiation de la rupture de clivage [49 à 55]. Ce sont essentiellement des études en microscopie optique qui mettent en évidence les concentrations de contraintes et les embryons de fissures qui apparaissent au niveau des croisements. Dans un article de synthèse, Hull [54] a montré que tous les types de croisements peuvent avoir lieu et qu'ils s'accompagnent tous de concentrations de contraintes très fortes. En particulier, il a mis en évidence dans tous les cas des configurations qu'il interprète comme des embryons de fissures. Il rejoint cependant les prévisions de Sleeswyk corroborées par les observations de Honda [52] : le croisement de type [110] est celui qui provoque le plus souvent le clivage. Il l'interprète en remarquant que, pour provoquer le clivage, il faut que les contraintes apparaissent dans un plan [100]. Les croisements ne sont donc « dangereux » que si l'axe d'intersection est situé dans un plan [100]. Mais faute d'analyser plus finement les contraintes produites par les réactions d'incorporation, Hull ne peut pas pousser plus loin son interprétation.

Abordant le problème sous un autre angle, Priestner et al. [56] donnent des conclusions différentes de celles des auteurs précédents. Ils remarquent que les contraintes théoriques de maclage et de clivage sont du même ordre de grandeur mais au moins dix fois supérieures à celles que peut subir un échantillon sans se rompre. Il faut donc concentrer les contraintes pour provoquer le maclage ou le clivage. Le même mécanisme peut engendrer alternativement l'un ou l'autre. Ce seraient les régions qui se trouvent à l'intersection de deux bandes de glissement qui serviraient de germe aussi bien au maclage qu'au clivage. C'est la raison pour laquelle on observerait de si nombreuses macles au voisinage d'une fissure de clivage [57]. Les deux phénomènes auraient donc une origine commune (l'intersection des bandes de glissement) au lieu que l'un entraîne l'autre.

Plus récemment Vagnieux et al. reprennent le problème de l'initiation du clivage au croisement des macles [58]. Ils supposent que le croisement ne peut se faire qu'avec apparition de la macle secondaire, image de la macle incidente dans la macle obstacle. Ils proposent alors que le critère de possibilité du croisement soit le suivant : la contrainte extérieure appliquée doit être relaxée par l'apparition de la macle secondaire. Ils en donnent la formulation mathématique.

Ce travail était en cours de rédaction quand nous avons eu connaissance d'une étude du même genre non encore publiée, effectuée par Mahajan. Cet auteur a déjà publié quelques études sur l'apparition de macles dans le fer déformé par ondes de choc [59 à 62]. L'étude porte sur l'interaction macle-dislocations et sur les croisements de macles observés en microscopie électronique dans un alliage Mo — 35 At % Re. Trois types de croisements sont observés : [111], [210] et [110]. Les relaxations dans les divers cas sont identifiées par leurs traces. Ce sont celles que nous avions prévues et quelquefois observées en microscopie optique en posant les mêmes hypothèses géométriques (l'article est paru précédemment [63]), Mahajan ne propose aucun critère pour le choix de telle ou telle réaction dans les différents cas.

Cette revue bibliographique nous a permis de situer le problème posé : la poursuite de la déformation, quel qu'en soit le mécanisme, dans une structure déjà maclée pose des problèmes théoriques non résolus à ce jour. Enfin, si le rôle des macles semble incontestable dans l'initiation du clivage, rien de précis n'a encore été dit faute d'une observation et d'une analyse fine des réactions qui se produisent à l'intersection de deux macles.

CHAPITRE III

Hypothèses géométriques. Différents types d'incorporation

I. — INTRODUCTION

Nous allons utiliser les résultats que nous venons d'exposer (en particulier ceux de Sleeswyk) pour formuler des hypothèses plausibles. Ceci nous permettra de prévoir la forme générale des relaxations qu'on peut observer dans les différents types d'intersection.

Nous verrons dans le chapitre des résultats expérimentaux que nous avons mis en évidence des relaxations sur les plans {100}, {110}, {112} et {123} de la matrice ou de la macle obstacle. Ceci fait, à priori, une centaine de plans de relaxation possibles pour une intersection quelconque. La formulation d'hypothèses simples et l'étude de leurs conséquences simplifient considérablement le problème. En particulier les restrictions géométriques réduisent à quelques unités le nombre de plans de relaxation possibles, une fois connu le type de l'intersection (c'est-à-dire la direction de l'axe d'intersection des plans de macles sécantes, voir annexe B). Cette étude facilitera la compréhension de l'exposé des résultats expérimentaux comme elle en a facilité la recherche (les seuls plans de relaxation mis en évidence sont ceux d'un type prévu à priori). Mais les hypothèses que nous allons formuler ne sont que des hypothèses : leur justification tiendra au fait qu'aucun des résultats expérimentaux obtenus ne les contredit.

II. — CONSERVATION DU CISAILLEMENT

Nous avons repris l'hypothèse de la conservation du cisaillement que tous les auteurs ayant étudié avant nous des problèmes semblables ont posée.

L'hypothèse est explicitement faite dans la théorie de Cahn. Elle est plus cachée dans la théorie de Sleeswyk. Dans celle-ci, en effet, on n'écrit que la conservation du vecteur de Bürgers (simple conséquence de l'hypothèse qu'il ne se forme pas de fissure). Au contraire, la conservation du cisaillement suppose, en plus, qu'il n'y ait pas accumulation de vecteur de Bürgers sur l'interface de réaction et donc que toutes les dislocations (parfaites ou partielles) qui s'y forment s'en éloignent par glissement. Il est inutile de discuter maintenant plus longuement ce point. Nous y reviendrons en détail au chapitre VI quand nous chercherons à dégager un critère permettant de prévoir le choix de telle forme de réaction de préférence à telle autre.

Le cisaillement provoqué par une macle peut se décrire aussi bien par les dislocations partielles que par des dislocations parfaites correspondant au regroupement de trois partielles. Pour des raisons de commodité d'écriture nous avons choisi la forme qui ne fait intervenir que des dislocations parfaites que nous avons appelé « dislocations émissaires » pour les distinguer commodément d'autres dislocations parfaites pouvant intervenir au cours de la réaction d'incorporation. C'est un abus de langage car le terme sous-entend un mécanisme de propagation (les dislocations émissaires précédant le joint incohérent de basse énergie) auquel il n'est absolument pas nécessaire de faire appel ici où nous ne cherchons qu'à décrire le cisaillement provoqué par une macle d'une façon correcte et facile à analyser. Nous verrons plus loin que ce regroupement évite de faire intervenir des dislocations du type 1/18 [111] qui n'auraient pas beaucoup de sens. Nous avons préféré effectuer le regroupement des partielles avant l'incorporation plutôt qu'après.

III. — NATURE DES PLANS DE RELAXATION

Ici encore nous poserons l'hypothèse admise par tous ceux qui ont traité un problème semblable. Les plans de relaxations qui apparaissent contiennent nécessairement l'axe d'intersection des deux macles.

L'hypothèse est explicite dans la théorie de Cahn (mais il faut étendre la signification de « plan de relaxation » à sa plus grande généralité pour englober la relaxation par maclage). Elle est moins évidente dans la théorie de

Sleeswyk où elle est d'une importance capitale pour les conséquences qu'elle entraîne. La réaction d'incorporation fixe les vecteurs de Bürgers des dislocations de réaction. Le plan de glissement est alors automatiquement fixé puisqu'il doit contenir :

1) Le vecteur de Bürgers;

2) L'axe d'intersection des deux macles.

Réciproquement, si on observe la trace superficielle d'une relaxation, on peut déterminer le plan de relaxation (il contient la trace et l'axe d'intersection) on peut alors en déduire quel est le vecteur de Bürgers actif et, par conséquent, quel type de réaction lui a donné naissance.

IV. — ETAT DE LA MACLE OBSTACLE AU MOMENT DU CROISEMENT

Pour pouvoir traiter simplement le problème de l'incorporation il faut supposer que la macle obstacle a des dimensions fixées. On peut alors ramener le croisement au problème simple de l'incorporation des émissaires de la macle incidente dans la macle obstacle.

Etant donné la vitesse de propagation d'une macle [64, 65], l'hypothèse semble raisonnable. Nous avons cependant vu un exemple clair où deux macles se sont rencontrées durant leur croissance. Il n'y a alors pas eu d'incorporation mais seulement réaction entre les dislocations émissaires (cf. chapitre V, paragraphe III).

V. — CONSÉQUENCES : LES DIFFÉRENTS TYPES D'INTERSECTION

A - Géométrie de l'intersection

Les hypothèses faites ci-desssus cernent totalement le problème.

Deux macles étant données, on connaît :

1) leur axe d'intersection;

2) les réactions d'incorporation possibles des dislocations émissaires de l'une dans l'autre.

On peut donc, à priori, prévoir les réactions possibles et déterminer expérimentalement lesquelles se produisent.

Nous avons rassemblé dans les annexes l'ensemble des éléments nécessaires à cette prévision. Afin de faciliter l'exposé nous avons toujours choisi l'orientation de telle sorte que la macle obstacle soit la macle (112) $<11\bar{1}>$

Quand on étudie le croisement de deux macles, il y a deux éléments essentiels qu'on peut traiter de façon totalement distincte :

1) L'incorporation des dislocations émissaires : le traitement mathématique consiste à décomposer le vecteur de Bürgers de la dislocation incidente dans les axes de la macle obstacle. Comme la réaction ne dépend que de la nature du vecteur de Bürgers de la dislocation émissaire, les trois macles qui ont la même dislocation émissaire seront traitées de façon identique de ce point de vue (il s'agit des trois macles correspondant aux trois plans {112} qui contiennent la même direction [111]). Il y a quatre vecteurs [111] possibles. Donc, du point de vue de l'incorporation des émissaires, quatre familles de macles. Des considérations de symétrie permettent de réduire ce nombre à trois. Deux macles appartiennent à une même famille si la projection du vecteur de Bürgers de leur dislocation émissaire sur la normale à la macle obstacle est identique. Par exemple, si on se donne comme macle obstacle la macle (112) $<11\bar{1}>$ les onze autres macles possibles se regroupent en trois familles A, B et C respectivement caractérisées par le $\vec{b}$ de leurs dislocations émissaires : $1/2 <11\bar{1}>$ pour A, $1/2 <1\bar{1}1>$ et $1/2 <\bar{1}11>$ pour B et $1/2 <111>$ pour C (ceci est traité en détail dans l'annexe B).

2) L'axe d'intersection : il introduit des restrictions géométriques pour le glissement des dislocations formées lors de l'incorporation des dislocations émissaires : nous venons de voir qu'il y a trois macles possibles pour une même dislocation émissaire. Ces trois macles donneront lieu à des réactions d'incorporation identiques mais les configurations géométriques des relaxations qui dépendent de la nature de l'axe d'intersection seront différentes et caractéristiques de cet axe.

Nous avons présenté en annexe B les différents types d'intersection : les intersections sont repérées par les indices cristallographiques de l'axe commun aux deux macles. Il y

en a six : [111], [210], [311], [110], $[531]_{a \text{ et } b}$. Le tableau B donne l'axe d'intersection des 12 macles possibles entre elles.

B - Réaction d'incorporation des différentes familles

L'annexe C présente les réactions d'incorporation. Nous allons résumer rapidement les résultats obtenus pour les différentes familles (la famille est constituée par l'ensemble des macles ayant un certain type de dislocations émissaires).

1) Famille A : $\vec{b} = 1/2 <11\bar{1}>$. La dislocation émissaire correspond à la dislocation de cisaillement de la macle obstacle. C'est le cas qui répond aux hypothèses de Cahn : la dislocation émissaire de la macle incidente peut s'incorporer sans réaction dans la macle obstacle. Les croisements correspondants sont évidemment du type [111], puisque cette direction est commune aux deux macles sécantes.

2) Familles B : $\vec{b} = 1/2 <\bar{1}11>$ ou $1/2 <1\bar{1}1>$. Il y a deux vecteurs de Bürgers dans cette famille. Les dislocations correspondantes créent en s'incorporant un décalage d'un plan {112}. Les intersections des macles correspondantes sont de trois types possibles : [210], [311], $[531]_a$.

3) Famille C : $\vec{b} = 1/2 <111>$. Les dislocations ayant comme $\vec{b}$ le vecteur de cette famille créent en s'incorporant le décalage de deux plans {112}. Les intersections correspondantes sont de deux types possibles : [110] et $[531]_b$.

L'incorporation des dislocations dont le $\vec{b}$ appartient aux familles B et C pose un problème : les vecteurs incidents ne sont pas des périodes entières du réseau de la macle obstacle. Il y a donc réaction sur le joint de macle cohérent. Nous avons distingué deux types de réactions :

1) Réaction de type 1.

La parfaite incidente crée une parfaite dans la macle obstacle et laisse deux partielles sur le plan de macle (les partielles laissées sont celles qui peuvent border la portion de joint de macle incohérent formé comme nous l'avons montré en annexe D).

2) Réaction de type 2.

La parfaite incidente crée une dislocation de Cottrell ($b = [100]$) dans la macle et laisse une partielle sur le plan de macle (ici encore, la partielle est précisément celle qui peut former le joint de macle incohérent). Cette réaction a des variantes : on peut décomposer la barrière de Cottrell formée en deux dislocations parfaites qui peuvent glisser soit dans la macle, soit l'une dans la matrice et l'autre dans la macle (on parlera alors d'incorporation mixte, voir annexe C, p. 4 et 5).

Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus. Les réactions d'incorporation des deux types y sont données pour toutes les dislocations émissaires possibles. La macle obstacle est (112) $<11\bar{1}>$.

Nous avons ainsi les données nécessaires à l'interprétation. Le choix de tel ou tel mode de relaxation dans tel ou tel cas d'intersection fera l'objet de la discussion des résultats expérimentaux.

Famille	Réaction d'incorporation de la dislocation émissaire incidente	Décomposition de type 1	Décomposition de type 2
A	$1/2 <11\bar{1}>_M \rightarrow 1/2 <\bar{1}\bar{1}\bar{1}>_T$		
B	$1/2 <\bar{1}11>_M \rightarrow 1/6 <5\bar{1}1>_T$	$2 \times 1/6 <11\bar{1}>_T + 1/2 <1\bar{1}1>_T$	$1/6 <\bar{1}\bar{1}\bar{1}>_T + <100>_T$
	$1/2 <1\bar{1}1>_M \rightarrow 1/6 <\bar{1}51>_T$	$2 \times 1/6 <11\bar{1}>_T + 1/2 <\bar{1}11>_T$	$1/6 <\bar{1}\bar{1}\bar{1}>_T + <010>_T$
C	$1/2 <111>_M \rightarrow 1/6 <115>_T$	$2 \times 1/6 <\bar{1}\bar{1}1>_T + 1/2 <111>_T$	$1/6 <11\bar{1}>_T + <001>_T$

CHAPITRE IV

Méthodes expérimentales

I. — INTRODUCTION

Nous avons observé les croisements de macle en microscopie optique et électronique. Le problème essentiel est de savoir quel type de croisement on observe. Ceci exige qu'on puisse identifier les macles qui se coupent et donc les orienter par rapport à la matrice qui les entoure. Ceci nous a amené à utiliser des éprouvettes monocristallines pour les observations en microscopie optique. En microscopie électronique, où il y a des possibilités d'orientation grâce à la microdiffraction, nous avons le plus souvent utilisé des polycristaux.

Nous allons exposer le détail des différentes techniques mises en œuvre, puis nous exposerons un certain nombre de propriétés géométriques des clichés de diffraction obtenus dans des conditions d'orientation remarquables. Nous y ferons référence dans le cours du chapitre suivant réservé aux résultats expérimentaux.

II. — FABRICATION DES MONOCRISTAUX

La méthode de fabrication a fait l'objet d'un rapport détaillé que nous allons résumer (Loridan [66]). C'est une application de la méthode mise au point par Takeuchi [67] et introduite à l'Irsid par Terasaki [7].

Le lingot de fer dont la composition est donnée dans le tableau ci-dessous a subi diverses transformations dont, en dernier lieu, un écrouissage à froid de 95 %. Des bandes de tôles de $350 \times 35 \times 1{,}2$ mm^3 ont été découpées puis recuites en phase α avant de subir l'écrouissage dit critique. (Les meilleurs résultats sont obtenus quand l'éprouvette est entièrement envahie par les bandes de Lüders. Or l'écrouissage correspondant dépend de la vitesse nominale de la machine de traction [68]. On peut ainsi trouver une gamme de vitesses donnant une série d'écrouissages différents où les résultats sont identiques.)

Composition (% en poids)							
C	O	N	Si	Mn	Ni	S	P
0,010	0,0032	0,002	0,005	0,0015	0,006	< 0,005	0,003

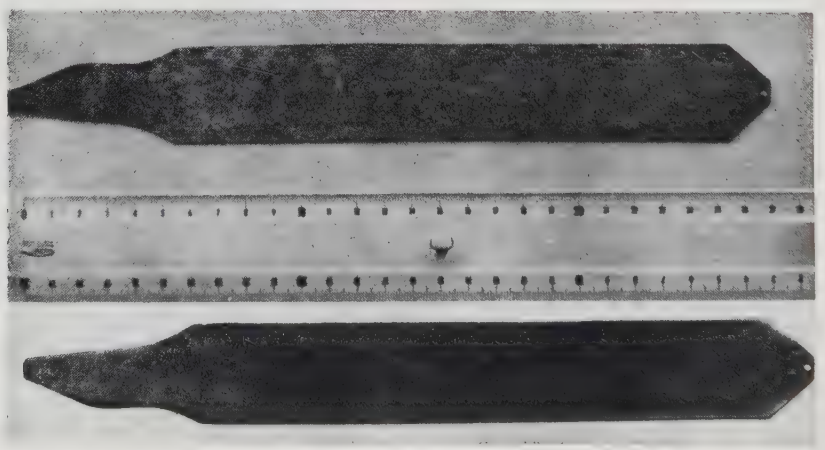


Fig. IV.1.

En haut : le germe a été découpé dans la partie recristallisée.
En bas : au cours du recuit dans le four à gradient, le germe a envahi toute l'éprouvette.

La recristallisation est faite dans un four à gradient de température dans lequel on plonge progressivement l'éprouvette. Dans un premier temps, seule l'extrémité de l'éprouvette subit la recristallisation. On peut alors tailler et éventuellement réorienter un germe convenablement choisi qui envahira ultérieurement l'éprouvette (fig. IV.1).

III. — OBSERVATIONS EN MICROSCOPIE OPTIQUE

A - Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes (voir schéma fig. IV.2) sont taillées dans une tôle monocristalline, puis orientées par un cliché de Laue en retour. Elles sont ensuite polies chimiquement dans un mélange de 90 % d'eau oxygénée et de 10 % d'acide fluorhydrique (on élimine ainsi l'écrouissage que provoque la découpe de l'éprouvette) et enfin maclées par traction à la température de l'azote liquide.

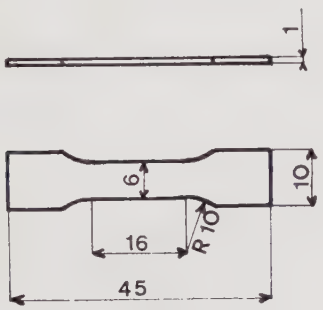


Fig. IV.2.
Schéma de l'éprouvette

B - Problème d'orientation

Il faut alors fixer l'orientation de l'éprouvette par rapport à un trièdre de référence constitué par exemple de l'axe de traction orienté et de deux autres axes, l'un dans le plan de l'éprouvette, l'autre normal à ce plan. On sait alors distinguer la face « positive » de la face « négative » selon que, quand on l'observe, la normale positive est dirigée vers l'observateur ou non.

Pour effectuer une observation cohérente il faut :

1) Aligner l'éprouvette sur la platine du microscope, par exemple en mettant l'axe de l'éprouvette parallèle au grand axe de la photographie.

2) Repérer l'orientation du trièdre fixé à l'éprouvette par rapport à la photographie. Il faut savoir quelle est la face observée et également quel est le sens positif de l'axe de traction. (Se tromper sur ce sens équivaut à faire subir une rotation de 180° à la platine du microscope. L'orientation des traces observées reste identique. Mais il faut savoir où est la direction positive de l'axe si on s'intéresse à la face d'impact d'une famille de macles sur une même macle obstacle.)

3) Tracer, à partir du cliché de Laue en retour, la projection stéréographique du cristal en repérant l'orientation du trièdre lié à l'éprouvette.

C. - Détermination de la nature des intersections

Nous avons donné dans l'annexe D le sens de cisaillement introduit par les différentes macles. Sur les 12 macles possibles il n'y en a qu'une partie orientée de telle sorte qu'elles relaxent la contrainte appliquée. On peut les prévoir à priori puisqu'on connaît l'orientation cristallographique de la direction de traction. Nous les appellerons les macles « favorables ».

Nous avons vérifié que ces macles « favorables » sont les seules à se former. L'orientation du cristal se fait au degré près. La précision sur l'orientation des traces des macles favorables est la même. En général il n'y a donc pas d'ambiguïté pour déterminer la nature des macles à partir de leurs traces. En cas de difficulté, il faut observer aussi le flanc de l'éprouvette. Ayant identifié les macles sécantes, on en déduit la nature de l'intersection observée (annexe B).

D - Critique des observations

Nous avons le plus souvent examiné les éprouvettes à l'aide du dispositif de contraste interférentiel mis au point par Nomarski [69] utilisé en contraste noir-blanc. Cette technique est la plus sensible pour mettre en évidence des traces superficielles de glissement très fin. Si cette trace est bien définie, les hypothèses faites au chaptire III, paragraphe 3 sur la géométrie du glissement permettent de déterminer le plan de relaxation concerné.

Lorsque les relaxations ont lieu dans la matrice, les traces sont en général nettes, lon-

gues, bien définies. On peut alors le plus souvent déterminer avec sûreté le plan concerné. Par contre, les relaxations dans les macles sont le plus souvent confuses, limitées à la largeur de la macle. De plus elles apparaissent dans une partie de métal déjà perturbée (il y a une modification de profil de la surface due au maclage). Il est donc extrêmement difficile de déterminer l'orientation précise de la trace observée et donc de tirer des conclusions nettes de ces observations.

IV. — OBSERVATIONS EN MICROSCOPIE ÉLECTRONIQUE

A - Préparation des éprouvettes

Il est difficile d'amincir convenablement un monocristal maclé par suite de la différence de vitesse de polissage qui existe entre la matrice et les macles. Aussi avons-nous renoncé à l'avantage de connaître précisément l'orientation de l'axe de traction par rapport au cristal et avons-nous fait nos observations sur les polycristaux à grains fins. Un certain nombre d'observations ont également été faites sur un alliage de fer à 2 % de silicium qui présente le double intérêt de mieux se polir et de se macler plus facilement.

Les lames minces ont été tirées de rubans de métal de $50 \times 10 \times 1$ mm^3 soigneusement recuits, puis maclés à la température de l'azote liquide. Ces rubans ont été amincis d'abord dans le bain de polissage chimique 90 % d'eau oxygénée-10 % d'acide fluorhydrique et enfin dans un bain électrolytique de 90 % de butoxyéthanol et 10 % d'acide perchlorique réfrigéré à 0 °C. Les lames, découpées à l'aide d'une lame de rasoir, ont été examinées sous 100 kV dans un microscope électronique Philips EM 200 muni d'une platine goniométrique permettant un basculement de $\pm$ 45° et d'un dispositif automatique de fond noir par basculement du faisceau.

B - Problèmes d'orientation

a) Système de référence pour le tracé de la projection stéréographique

Il est essentiel de pouvoir déterminer l'orientation de la matrice et des différentes macles dans le cours même de la manipulation afin de prévoir et d'identifier les plans de relaxation actifs. Nous avons donc orienté systématiquement les différents cristaux en suivant la méthode décrite par Thomas [70] : l'échantillon est fixe par rapport à un repère lié à la platine goniométrique. Les projections stéréographiques des différents cristaux sont tracées par rapport à ce repère. La projection qu'on trace est donc identique à celle qu'on tracerait à partir d'un cliché de Laue pris dans les conditions suivantes :

1) La source de rayons X est confondue avec le canon d'électrons;

2) La platine goniométrique est placée à un basculement nul (qui donne l'orientation référence du cristal étudié).

Connaissant la projection stéréographique de la matrice, on peut calculer les coordonnées des pôles de tous les plans dans le système de référence défini par la platine goniométrique et en déduire le basculement à donner à cette platine pour mettre le plan considéré en position de réflexion de Bragg.

b) Détermination de l'orientation de la matrice et des macles à partir des taches [110]

Nous avons montré dans l'annexe A que la macle et la matrice associée ont une zone [111] commune. Les trois taches [110] qui s'y trouvent leur sont donc communes. L'observation soigneuse de l'image en fond noir obtenue à l'aide d'une tache [110] permet de décider quel est le cristal en position de Bragg qui réfléchit la tache considérée (la tache peut être caractéristique de la matrice, de la macle ou commune aux deux). On peut voir aisément que cette observation menée sur trois taches [110] non coplanaires de la matrice suffit à identifier l'orientation cristallographique de la matrice et de toutes les macles possibles. On a trois cas possibles : la figure IV.3 permet de suivre le raisonnement :

1) Deux des taches examinées sont communes à la macle et à la matrice. Les taches communes appartiennent alors nécessairement à une même zone [111] qui est la zone commune (fig. IV.3 A).

2) Une seule tache est commune : la zone [111] commune est alors celle qui passe par la tache commune et qui ne contient pas les autres taches examinées (fig. IV.3 B).

3) Aucune tache n'est commune : la zone [111] commune est alors la seule zone [111] qui ne contient aucune des taches examinées (fig. IV.3 C).

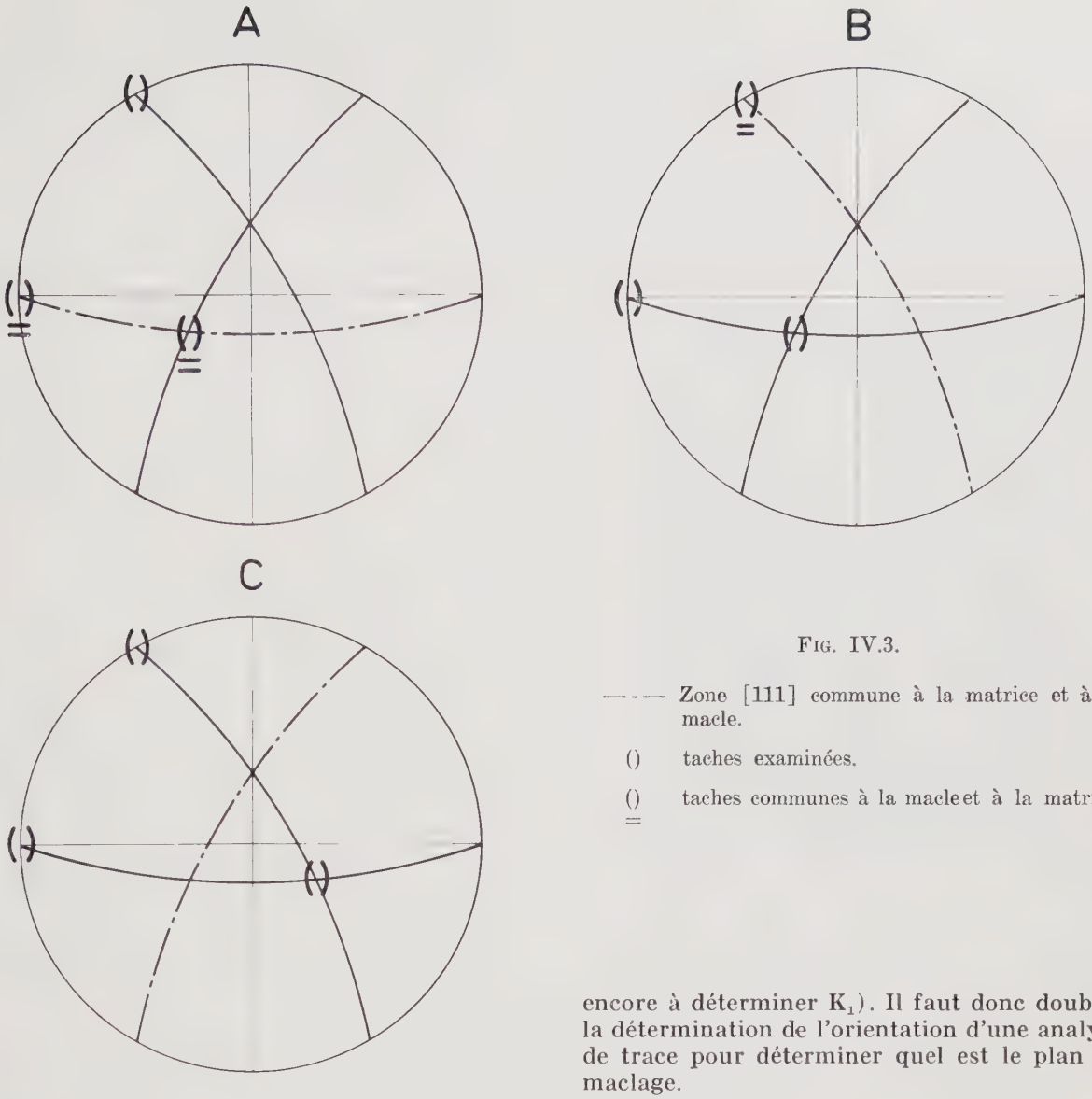


FIG. IV.3.

——·—— Zone [111] commune à la matrice et à la macle.

() taches examinées.

() taches communes à la macle et à la matrice.
=

Connaissant alors l'orientation de la matrice et la zone commune, on peut tracer la projection stéréographique de la macle en suivant la construction donnée en annexe E.

C - Détermination de la nature des intersections et des relaxations

Nous savons maintenant déterminer l'orientation cristallographique d'une macle quelconque. Mais ceci ne suffit pas à déterminer les éléments de maclage puisque les trois macles d'une même zone [111] ont la même orientation (en d'autres termes l'orientation du cristal maclé fixe la nature de η_1; il reste encore à déterminer K_1). Il faut donc doubler la détermination de l'orientation d'une analyse de trace pour déterminer quel est le plan de maclage.

Une première méthode consiste à observer la trace de la macle sur le plan de la lame. Cette méthode se heurte à une objection fondamentale : on peut facilement orienter le cristal mais il est très difficile de déterminer l'orientation du plan de la lame mince : la lame est introduite dans une région proche des pièces polaires de l'objectif, elle est donc soumise à un champ important qui a pour effet de courber les lames magnétiques. On peut donc faire une erreur grossière en supposant que l'échantillon est « à plat » dans le porte-objet (ou que le plan de la lame est effectivement normal au faisceau d'électron quand la platine goniométrique est placée à un basculement nul). Ceci peut introduire dans l'analyse de la trace des erreurs de plusieurs dizaines de degrés.

La meilleure méthode consiste à amener le plan correspondant au plan de macle en position de réflexion de Bragg. La trace de la macle apparaît alors fine et est exactement normale au $\vec{g}$ du vecteur de diffraction correspondant. La figure IV.4 montre un exemple de cliché pris en fond noir à l'aide du vecteur de diffraction $\vec{g}$ correspondant au plan de macle.

FIG. IV.4.

Miscroscopie électronique.
Identification du plan de macle

C'est également cette méthode qu'il convient d'employer si on veut identifier de façon formelle un plan de relaxation. La conséquence directe de cette remarque est que, quel que soit le croisement étudié, il faudra toujours chercher à mettre debout l'axe d'intersection des deux macles sécantes afin que l'ensemble des plans de macle et de relaxation apparaissent de profil.

V. — RÉFLEXIONS ET COUPES REMARQUABLES

Toutes les propriétés que nous allons énoncer maintenant sont des conséquences des relations de symétrie entre la matrice et une macle que nous avons présentées en détail dans l'ensemble des annexes. Elles peuvent, pour l'essentiel, se résumer à la propriété suivante qu'il faut avoir constamment à l'esprit : une macle et la matrice associée ont en commun toute une zone [111]. L'axe [111] commun est la direction η_1 de la macle (annexe A).

A - Les réflexions

En pratique, dans certains cas, on peut déduire très vite des renseignements à partir d'une seule observation. Il est facile de reconnaître sur l'écran les taches d'indices les plus bas : [110], [100], [112]. De plus, ce sont elles qui donnent les meilleurs contrastes. Elles sont prises seules en compte dans l'énoncé des règles pratiques qui suivent.

a) Les réflexions communes à deux macles quelconques

Nous allons établir les deux règles suivantes :

1) Deux macles qui ont en commun une tache [110] qui n'est pas également une tache de la matrice se coupent selon [111] et ont donc la même orientation cristallographique.

2) Deux macles qui ont en commun toute autre tache que [110] d'indices inférieurs ou égaux à [112] se coupent selon [111].

En effet, une macle et sa matrice ont une zone [111] commune.

Si on considère une deuxième macle, il y a deux cas :

1) Elle a en commun avec la matrice la même zone [111] que la première macle. Les plans des deux macles se trouvent sur cette zone commune. Nous avons montré en annexe A que les trois macles d'une même zone [111] ont une orientation cristallographique identique. Ceci peut se voir en remarquant que les deux plans de macle se déduisent l'un de l'autre par une rotation de $\pm$ 120° autour de l'axe [111] commun. Cette rotation conserve l'orientation cristallographique des deux macles et de la matrice. Dans ce cas les deux macles se coupent selon l'axe [111] commun, elles ont des orientations cristallographiques identiques et elles ne peuvent se distinguer que par leurs plans de composition.

2) Elle n'a pas la même zone [111] en commun avec la matrice. Leur seule tache

commune est alors la tache [110] qui se trouve à l'intersection des deux coupes {111} communes. Cette tache [110] est commune également à la matrice (fig. IV.5).

En conclusion, nous avons établi que, si on se limite aux réflexions de bas indice, deux macles qui ne se coupent pas selon la direction [111] n'ont en commun qu'une seule tache. C'est une tache [110]. Elle est commune à la matrice et aux deux macles.

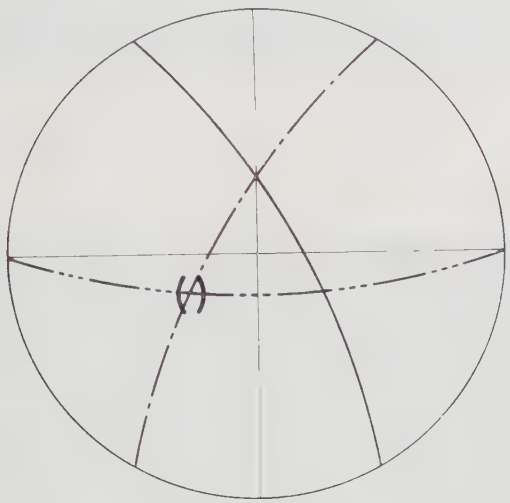


FIG. IV.5.

- — - — Zone commune matrice-macle 1.
— - - - — Zone commune matrice-macle 2.
() Tache [110] commune matrice-macles 1 et 2.

b) Extinctions spécifiques des dislocations émissaires

Considérons la macle (112). Les dislocations émissaires correspondantes ont un vecteur de Bürgers égal à $1/2 <1\bar{1}1>$. En retenant pour critère d'extinction la règle $\vec{g} . \vec{b} = 0$, on voit que toutes les réflexions de la zone $<1\bar{1}1>$ rendent ces émissaires invisibles. Ces réflexions ont, en outre, ceci de remarquable qu'elles sont communes à la matrice et à la macle (elles appartiennent à la zone [111] commune).

Notons que cette propriété rend délicate l'étude du système de frange qui apparaît sur les macles minces. Nous en donnons un exemple sur la figure IV.6 *a*. Si on admet avec Hull [71] que les dislocations partielles de macle y jouent un rôle et qu'on essaye de les mettre en évidence on se heurte au problème suivant :

— ou bien on prend un cliché avec une tache spécifique de la matrice ou de la macle et on voit le système de franges (fig. IV.6 *a* et *b*) ;

— ou bien on prend le cliché avec une tache commune, mais alors elle appartient à la zone [111] commune, et elle met hors contraste les partielles (fig. IV.6 *c*).

La seule solution est de prendre le cliché avec une tache commune qui ne soit pas de la zone [111]. Elle aura alors des indices élevés. Nous l'avons fait par exemple pour la tache [111] commune. Le cliché montre alors un contraste essentiellement différent (fig. IV.6 *d*).

Nous avons montré que les trois taches [110] communes à la matrice et à une macle mettent hors contraste les émissaires de cette macle. Deux macles quelconques ont toujours une tache [110] en commun avec la matrice. Cette tache qui appartient simultanément aux deux zones communes met hors contraste les deux familles d'émissaires des deux macles.

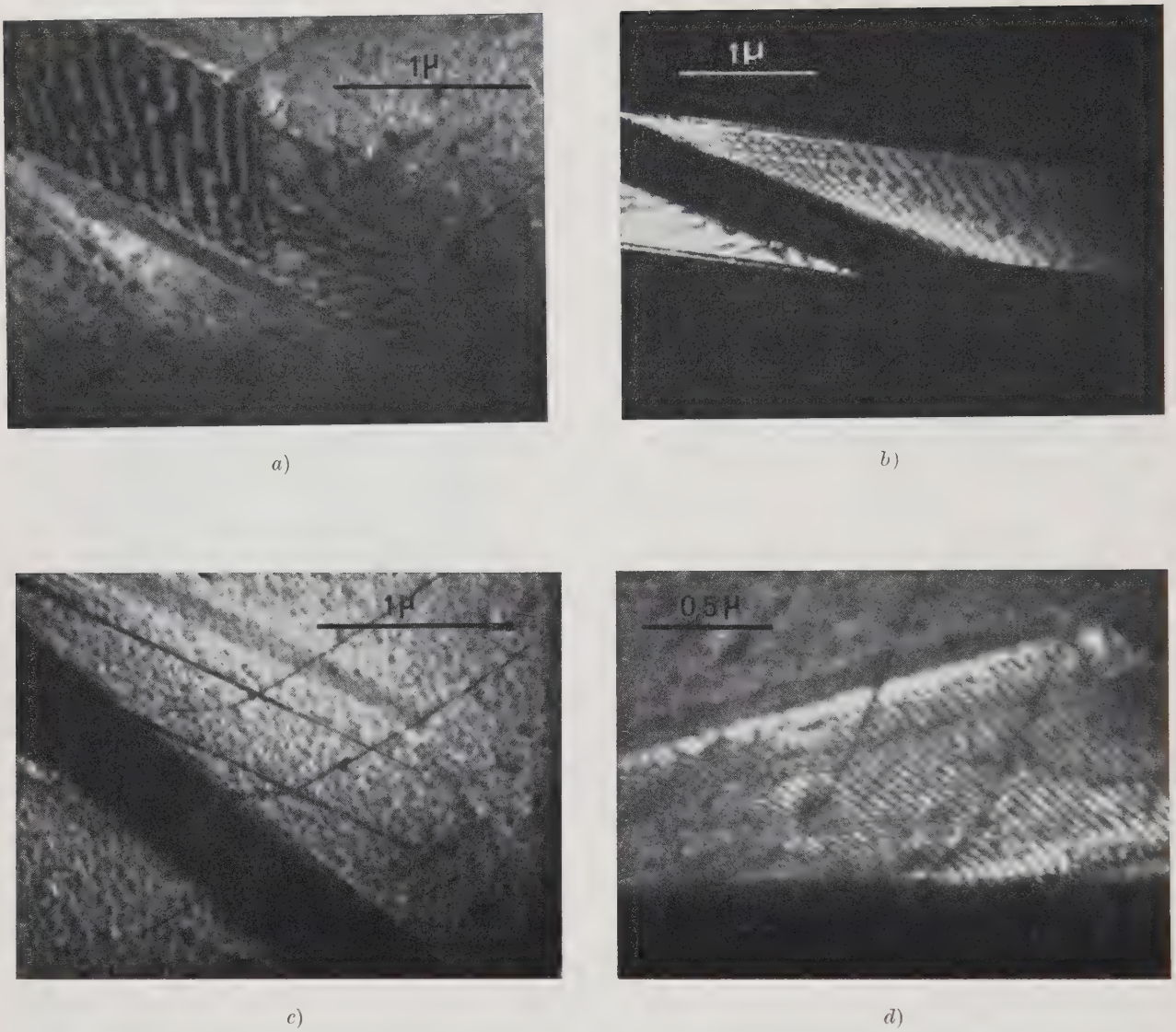
B - Les coupes

Quand on étudie le croisement des deux macles on peut obtenir les coupes d'au moins trois cristaux superposés en plaçant l'aire sélectionnée juste à l'endroit du croisement. Les clichés peuvent alors devenir extrêmement complexes. Nous en donnons un à titre d'exemple sur la figure IV.7. Aussi il est bon de reconnaître les coupes et les superpositions de coupes les plus fréquentes. Nous allons traiter deux exemples facilement identifiables : {111} et {113}.

a) Coupe {111}

Si on a orienté la matrice de telle sorte qu'elle ait un axe [111] parallèle au faisceau d'électrons le cliché de diffraction correspondant est une coupe {111}. Il y a alors deux solutions pour le cliché de diffraction d'une macle quelconque :

1. - La coupe {111} correspond à l'axe [111] commun. La zone est alors commune aux deux cristaux. Toutes les taches sont communes à la matrice et à la macle. Le schéma du



a) *b*)

c) *d*)

FIG. IV.6.

Microscopie électronique

a) : [110] matrice *b*) : [100] macle *c*) : [110] matrice-macle
d) : [111] matrice-macle. *d* est désorientée par rapport aux trois autres.

cliché de diffraction obtenu est donné sur la figure IV.8.

2. - La coupe {111} ne correspond pas à l'axe [111] commun. Il n'y a alors qu'un axe [110] en commun pour les deux coupes. La coupe de la macle est alors du type {115}. Le schéma du cliché de diffraction obtenu est donné sur la figure IV.9. (Notons que la correspondance est exacte entre ces deux coupes : nous le savions déjà puisque nous avons montré dans l'incorporation des vecteurs de Bürgers des parfaites que :

$$1/2\ [111]_M - 1/6\ [115]_T\ ^*.)$$

* Rappelons que l'indice M signifie que le vecteur est repéré dans les axes de la matrice alors que l'indice T signifie qu'il est repéré dans les axes de la macle.

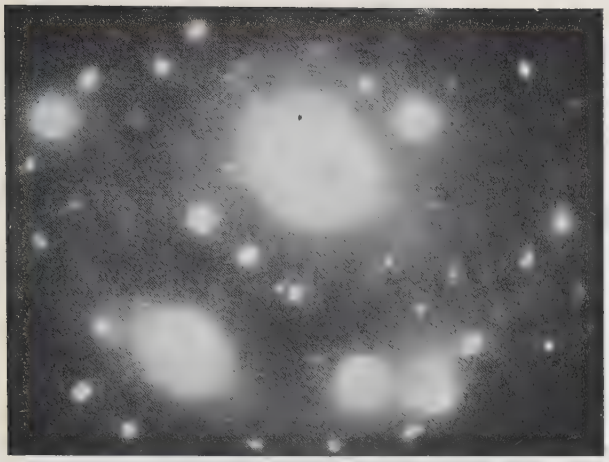


FIG. IV.7.

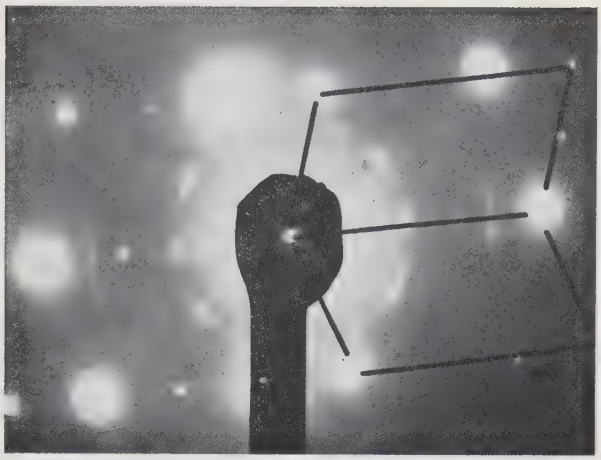


FIG. IV.10.

2 coupes {113} superposées. Les deux coupes sont symétriques par rapport à l'axe [112] commun.

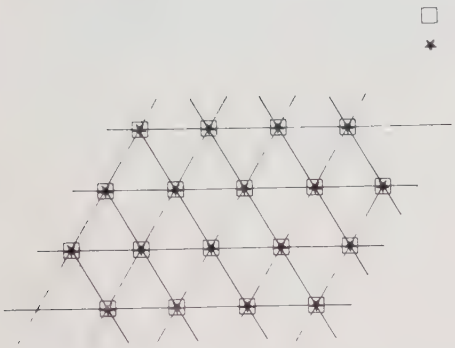


FIG. IV.8.

Correspondance $\{111\}_M$ - $\{111\}_T$.

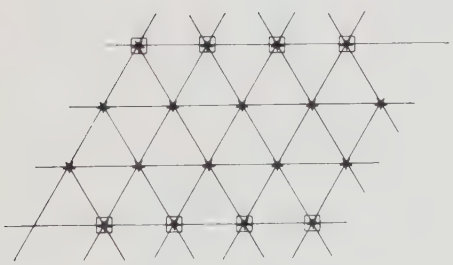


FIG. IV.9.

Correspondance $\{111\}_M$ - $\{115\}_T$.

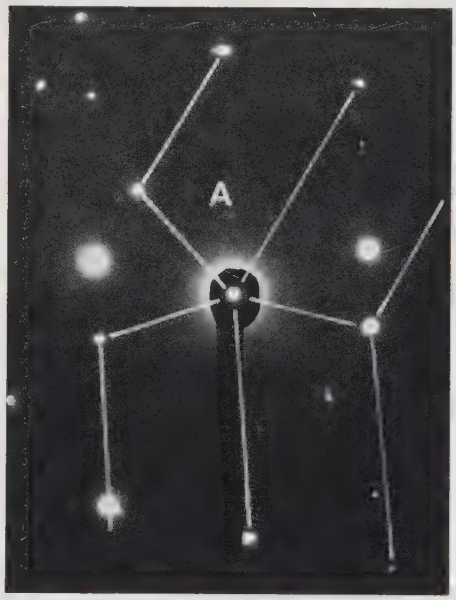


FIG. IV.11.

3 coupes {113} superposées. Noter A tache de double diffraction (voir fig. IV.12.).

b) Les symétries remarquables

Nous avons montré en annexe A comment on passe de la matrice à la macle par une symétrie autour du plan de macle {112}. Macle et matrice ont en commun les trois plans {112} de la zone [111] commune. On peut trouver l'orientation cristallographique de l'une quelconque des macles correspondant à ces plans {112} en prenant le cristal symétrique de la matrice dans l'un quelconque de ces plans {112}. En d'autres termes macle et matrice sont symétriques par rapport aux trois plans {112} qu'elles ont en commun. Donc les clichés de diffraction de la macle et de la matrice seront symétriques par rapport à tout axe [112] qu'ils ont en commun.

c) Exemple : coupes {113} superposées

La figure IV.10 montre un exemple caractéristique de deux coupes {113} superposées avec un axe [112] en commun. Le cliché a été obtenu en sélectionnant une aire à cheval sur la matrice et la macle. Il y a trois axes [112] communs, donc six orientations de la lame qui donneront cette configuration de diffraction.

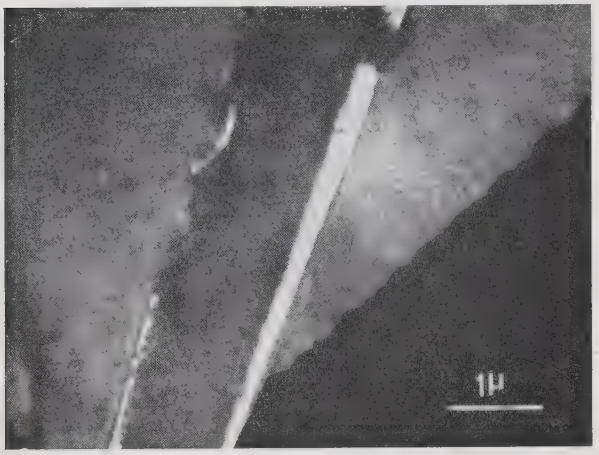


Fig. IV.12.
Fond noir sur A.

Le cliché de la figure IV.11 a été pris en sélectionnant l'aire juste à l'intersection de deux macles. Il représente trois coupes {113} superposées. Ceci ne suffit pas à prouver que les macles se coupent selon l'axe [113] qui est parallèle au faisceau. On notera que le cliché peut être compliqué par le phénomène de double diffraction. La tache A est une double diffraction entre la matrice et l'une des macles, ainsi que le prouve le cliché pris en fond noir sur la tache A (fig. IV.12).

Nous pourrions présenter les mêmes exemples sur les coupes {210} et aboutir aux mêmes conclusions. Ainsi le cliché de diffraction de la figure IV.7 représente trois coupes {210} superposées. (Mais le cliché est encore compliqué par la double diffraction. Il y a de plus des taches parasites dues à un dépôt d'oxyde sur la surface de la lame.)

CHAPITRE V

Résultats expérimentaux

Pour simplifier l'exposé qui va suivre, nous avons toujours indexé le cristal de telle sorte que la macle obstacle soit (112). Si plusieurs exemples d'intersection du même type sont présentés, la macle incidente sera repérée avec les mêmes indices dans tous les cas. Ainsi les notations sont homogènes dans les divers exemples. Enfin, rappelons que l'indice M signifie qu'on repère le vecteur dans les axes de la matrice et l'indice T dans ceux de la macle obstacle.

I. — LE CROISEMENT DE TYPE [111]

Deux macles qui se coupent selon la direction [111] ont la même orientation cristallographique. Comme nous l'avons montré au chapitre IV.5 A, le fond noir de la figure V.1 suffit à prouver que les deux macles se coupent selon la direction [111] (les deux macles ont en commun la tache [112] qui a servi à faire le fond noir).

Ce type de croisement se fait sans qu'il apparaisse de relaxation dans la matrice ou dans les macles (ceci se vérifie en microscopie optique [fig. V.2] et en microscopie électronique [fig. V.1]).

Dans certains cas la macle incidente traverse la macle obstacle. C'est le cas dans la figure V.3 prise en microscopie optique. L'aspect du croisement suggère que la partie du croisement commune aux deux macles s'est « démaclée » et a donc repris l'orientation de la matrice. Cet aspect a déjà été signalé par Smith et al.[72]. Nous n'avons pu fournir aucune preuve de ce « démaclage » car nous n'avons jamais observé des croisements complets de ce type en microscopie électronique. Nous avons signalé au chapitre II.5 A que Kounicky[45] a observé un croisement complet de ce type sans qu'apparaisse le démaclage prévu. Rien ne prouve donc l'existence du phénomène. L'aspect superficiel des croisements en microscopie optique peut fort bien être fortuit.

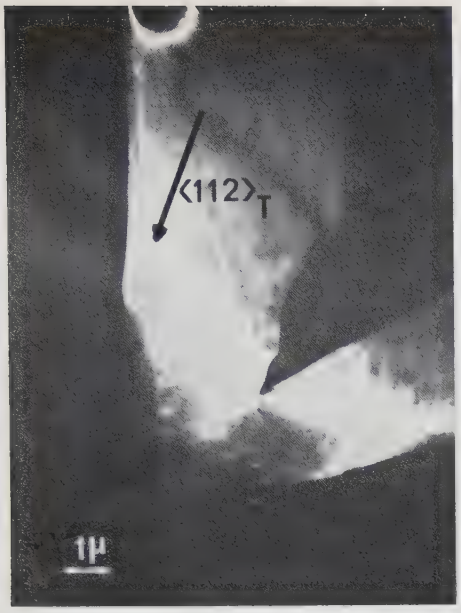
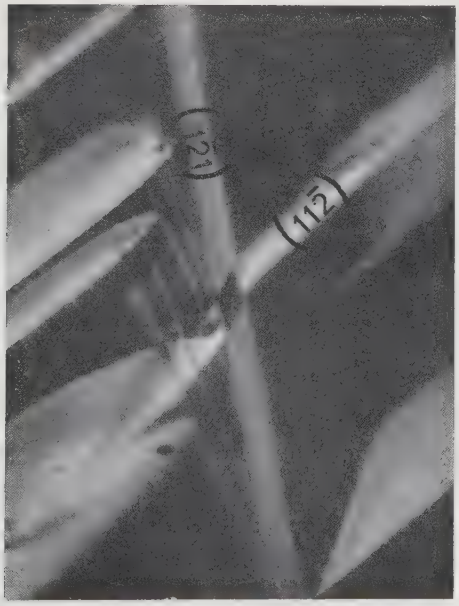


FIG. V.1

Microscopie électronique. Croisement [111].
Il n'apparaît pas de relaxations.

FIG. V.2 (× 450)

Microsocopie optique. Croisement [111].
Il n'apparaît pas de relaxations.



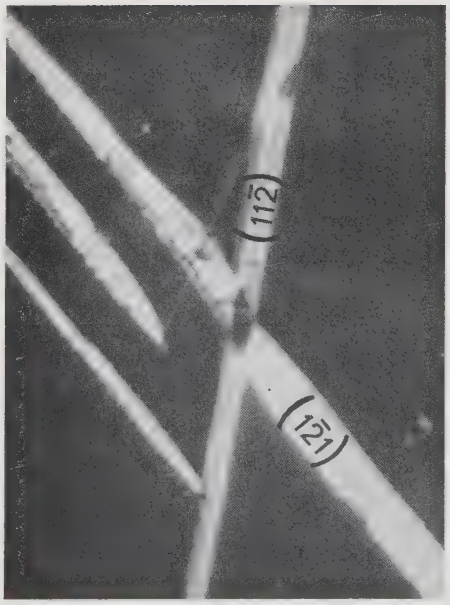


FIG. V.3 (× 450)

Microscopie optique.

Le contraste de la partie commune aux deux macles suggère le « démaclage ».

II. — LE CROISEMENT DE TYPE [210]

Nous avons observé que ce croisement peut s'effectuer de deux manières différentes.

A. - Avec relaxation dans le plan de la macle secondaire

a) Microscopie électronique

La figure V. 4 donne les projections stéréographiques de la matrice et de la macle obstacle (112) dans le cas du croisement $<02\bar{1}>$ observé. Les clichés des figures V. 5 et V. 6 montrent qu'il apparaît au moins deux relaxations : l'une dans la macle obstacle, l'autre dans la matrice. L'analyse de ces deux traces nous a permis d'identifier les plans de relaxation concernés. Ce sont :

— dans la macle obstacle une relaxation sur le plan $(\bar{1}12)_T$ qui est le plan où apparaîtrait la macle secondaire image;

— dans la matrice une relaxation sur le plan $(\bar{3}12)_M$.

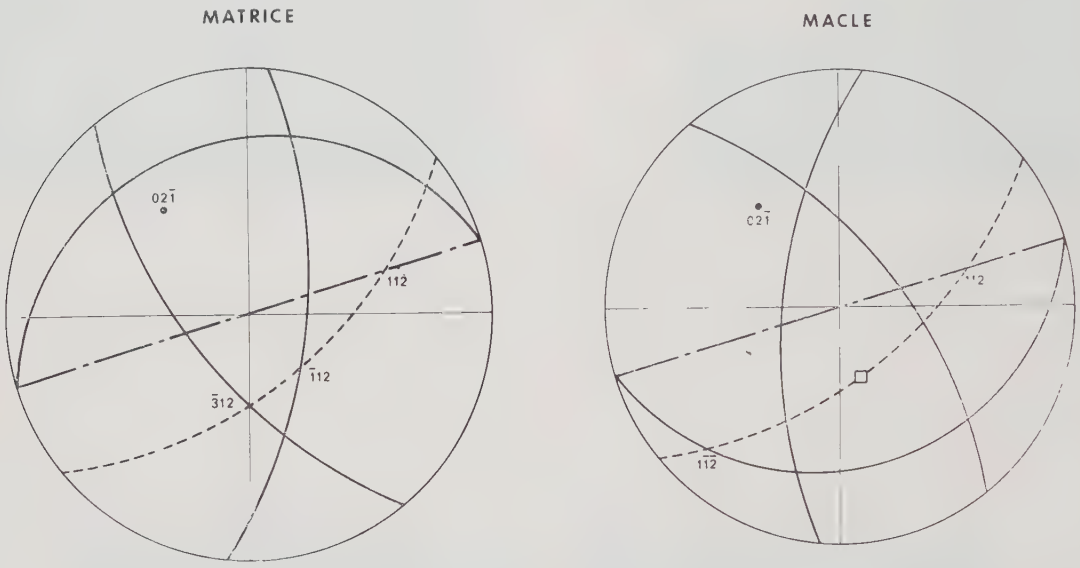


FIG. V.4

Projections stéréographiques de la matrice et de la macle obstacle

— - — Zone {111} commune matrice-macle obstacle.

- - - - - Zone correspondant à l'axe $<02\bar{1}>$ d'intersection des deux macles.

FIG. V.5

Microscopie électronique. Relaxation sur $(\bar{1}12)_T$.

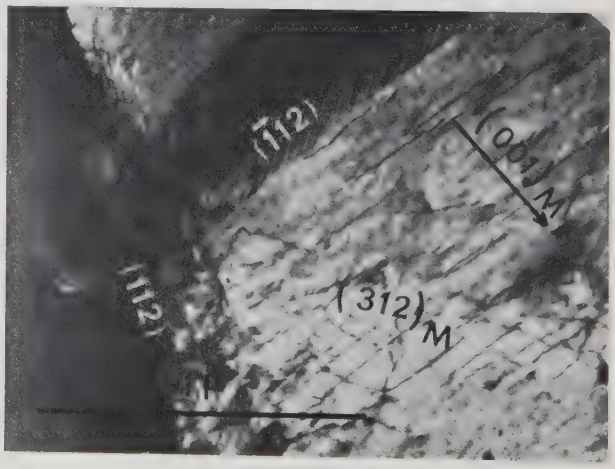


FIG. V.6

Microscopie électronique. Relaxation sur $(\bar{3}12)_M$.

b) Microscopie optique

Notons que le plan $(\bar{3}12)_M$ contient la direction $<02\bar{1}>$ d'intersection. Terasaki avait déjà mis en évidence des relaxations sur les plans {123} contenant l'axe [210] d'intersection précisément dans le cas de cette intersection [7]. Nous avons pu faire une observation analogue en microscope optique : le cliché de la figure V. 7 montre que la relaxation est apparue, dans ce cas, sur les deux plans {123} possibles.

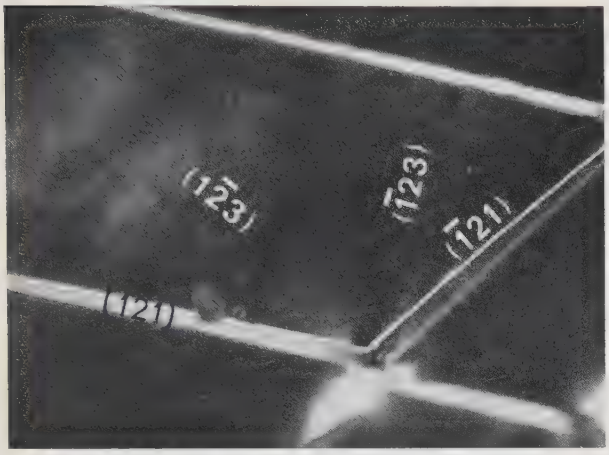


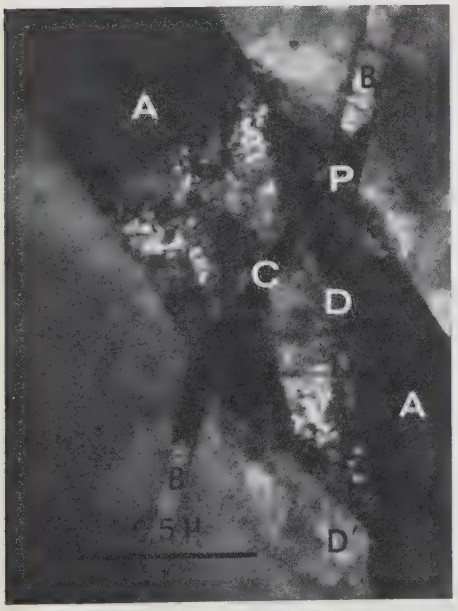
FIG. V.7 (× 450)

Microscopie optique.
Relaxation sur les deux plans {123} de la zone [210] d'intersection.

B. - **Avec relaxation sur le plan $\{100\}_T$**

a) **Microscopie électronique.**

Le cliché de la figure V. 8 est un fond clair en plusieurs ondes représentant l'intersection des deux macles A (112) et B ($\bar{1}$12) selon l'axe $<02\bar{1}>$. L'orientation est telle que l'axe $<02\bar{1}>$ est parallèle au faisceau d'électrons. Le schéma du cliché de diffraction correspondant est également donné sur la figure V. 8. Il est orienté convenablement par rapport à l'image. On voit bien sur le schéma comment on passe de la coupe {210} de la matrice aux coupes {210} des macles par une symétrie autour des axes <112> et $<\bar{1}12>$ respectivement. Ces deux derniers vecteurs sont normaux aux traces des deux macles sécantes elles-mêmes vues debout. Ces deux figures suffisent donc à identifier la nature des deux macles et de leur intersection. Nous avons reporté sur la figure V.9 les projections stéréographiques de la macle A et de la matrice.



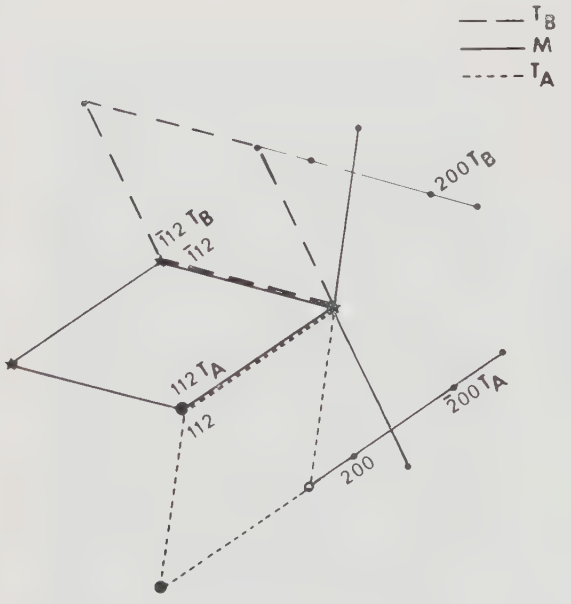


FIG. V.8

Fond clair *n* ondes. L'axe $<02\bar{1}>$ d'intersection est debout. Le schéma donne l'allure du cliché de diffraction correspondant avec les trois coupes {210} superposées

Comme le croisement a eu lieu complètement, le problème se pose de décider quelle est la macle incidente et laquelle est l'obstacle.

1. - Première hypothèse : B est l'obstacle, A a traversé B par un mécanisme quelconque. Le décalage entre les deux parties de B serait dû au cisaillement introduit par A. Le calcul montre que cette explication ne tient pas, car le cisaillement sur la trace de B ne doit pas dépasser 5° (le cisaillement d'une trace n'est sensible que si la trace est quasi normale à la macle obstacle).

2. - Deuxième hypothèse : A est l'obstacle. Nous verrons plus loin que la configuration

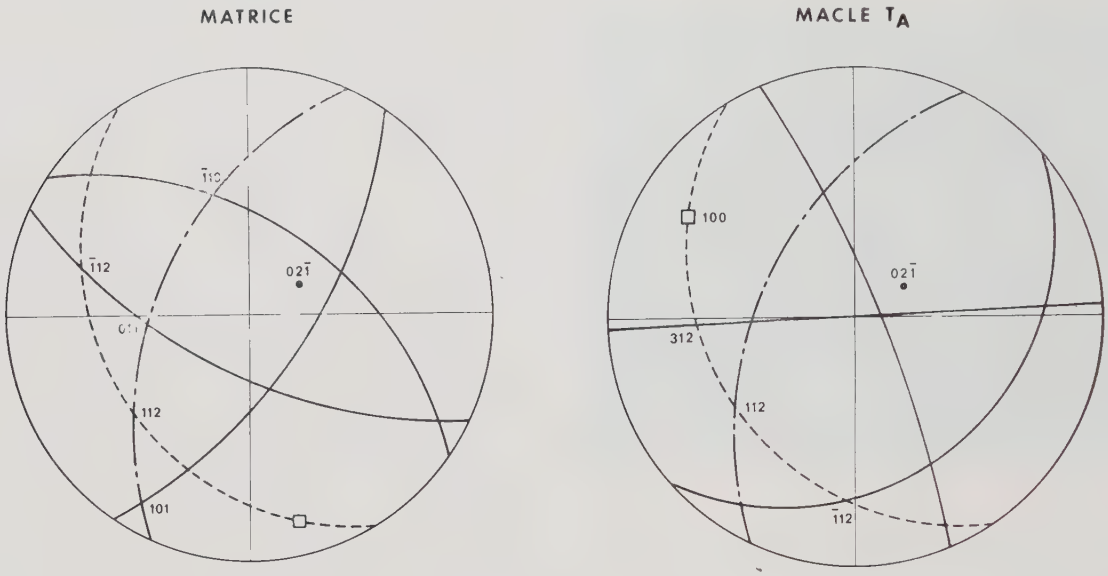


FIG. V.9

Projections stéréographiques de la matrice et de la macle obstacle.
— - — Zone {111} commune à la matrice et à la macle obstacle T_A.
- - - - - Zone correspondant à l'axe $<02\bar{1}>$ d'intersection des deux macles.

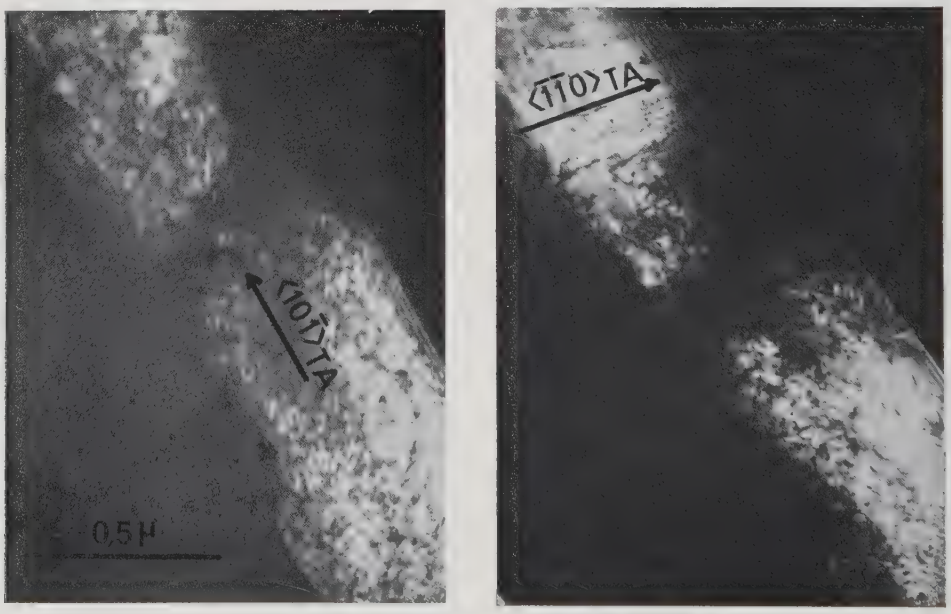


FIG. V.10

Microscopie électronique. On peut mettre C en contraste avec les taches de A.

observée ici est identique à celle qu'on observe couramment en microscopie optique où, le plus souvent, la nature de l'obstacle ne fait aucun doute car l'émergence n'a pas lieu. C'est donc l'hypothèse que nous avons retenue. Nous montrerons plus loin des évidences expérimentales qui confirment cette hypothèse.

Nous allons maintenant étudier la nature de la configuration C (voir fig. V.8). Ce n'est pas la macle secondaire image de B dans A car, dans les conditions de la figure V.8, C apparaîtrait symétrique de B dans le plan de composition de A. De plus, la figure V.10 montre qu'on peut mettre C en contraste avec les taches de A. C apparaît donc comme étant

FIG. V.11
Microscopie électronique.
Fond noir sur une tache de B.

FIG. V.13
Microscopie électronique.

FIG. V.12
Microscopie électronique.
Les dislocations émissaires sont hors contraste.

FIG. V.14
Microscopie électronique.

une portion de A désorientée à la suite d'une relaxation importante.

La figure V.8 nous permet alors facilement d'orienter les plans de relaxation qui apparaissent. Ainsi C contient la direction $<02\bar{1}>$ d'intersection (C est vu debout dans la figure V.8) et la trace de C est exactement normale à $<200>_T$. Le plan de C est donc $(100)_T$. Le même raisonnement nous permet d'identifier les relaxations DD' de la figure V.8 comme des relaxations qui apparaissent sur le plan $(312)_T$.

Ainsi nous avons établi que, dans ce croisement, il est apparu simultanément deux relaxations : l'une sur $(100)_T$, d'autre sur $(312)_T$.

A titre d'exemple, nous allons encore examiner quelques clichés pris sur cette intersection avec différents vecteurs de diffraction. Le fond noir de la figure V.11 montre comment B s'arrête sur A. Les fonds noirs des figures V.12, V.13 et V.14 montrent que le croisement fait apparaître des contraintes importantes qui sont relaxées par un réseau touffu de dislocations dont l'analyse semble délicate. Notons en particulier la figure V.12 prise avec la tache $<011>_M$ commune aux deux macles et à la matrice. On y voit encore une forêt de dislocations nettement en contraste. Il ne peut pas s'agir de dislocations émissaires de l'une ou l'autre des deux macles, puisque nous avons montré au chapitre IV, paragraphe 5 A. *b* que, avec cette réflexion,

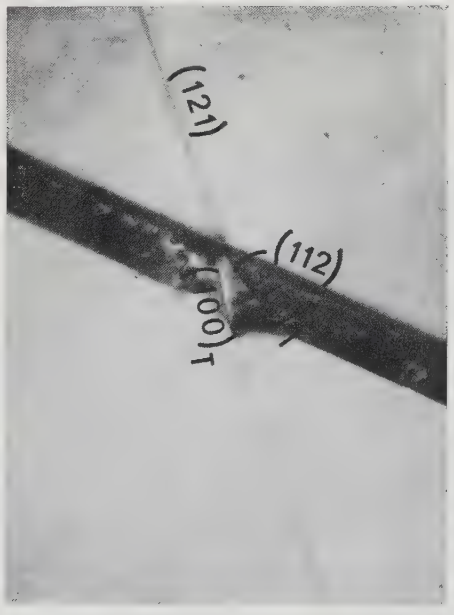


FIG. V.15 (× 450)

Microscopie optique.
Il apparaît deux relaxations dans la macle obstacle :
— une sur $(100)_T$;
— l'autre sur $(312)_T$.
L'émergence n'a lieu sous forme de macle qu'à l'extrémité de $(100)_T$.

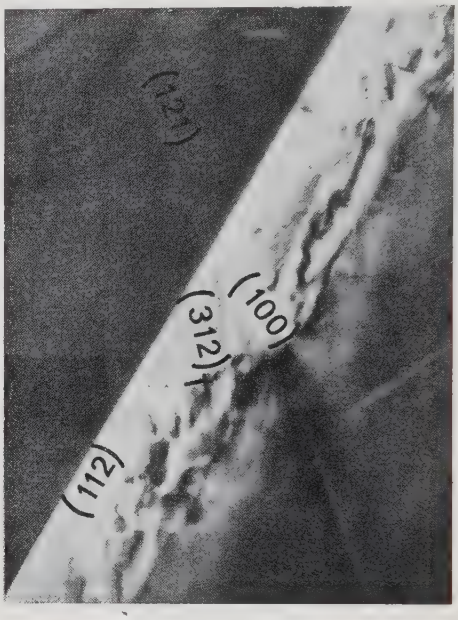


FIG. V.16
L'émergence a lieu ici à l'extrémité de $(312)_T$ et de $(100)_T$.

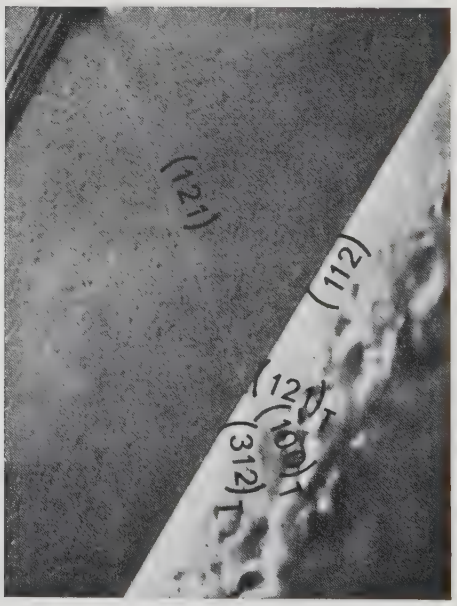


FIG. V.17
Il apparaît une relaxation sur le plan (121) qui correspond au plan de la macle secondaire.

elles sont toutes hors contraste. Ces dislocations sont donc le résultat des réactions d'incorporation que nous analyserons dans le chapitre suivant.

b) Microscopie optique.

Comme nous l'avons dit ci-dessus les faciès d'intersection de type [210] observés en microscopie optique rappellent la morphologie de la figure V.8. Nous en donnons trois exemples sur les figures V.15, V.16 et V.17. Les relaxations sur les plans $\{100\}_T$ et $\{123\}_T$ sont nettement visibles. On constate également que l'émergence, quand elle a lieu se fait le plus souvent à l'extrémité de la relaxation $\{100\}_T$ (fig. V.15), mais qu'elle peut parfois avoir lieu à l'extrémité de $\{123\}_T$ (fig. V.16).

C. - Résumé des résultats

En résumé nous avons montré que l'intersection de type [210] peut se faire selon différentes configurations :

1) Dans certains cas il apparaît au moins deux relaxations : l'une dans un plan $\{123\}_M$ et l'autre dans le plan de la macle secondaire image. Cette morphologie n'a été vue qu'au microscope électronique.

2) Le plus souvent la relaxation se fait par glissement sur le plan $\{100\}_T$. Cette relaxation est toujours doublée d'une relaxation sur le plan $\{123\}_T$. Cette morphologie qui semble la plus fréquente d'après les résultats de microscopie optique a également été observée en microscopie électronique.

III. — LE CROISEMENT DE TYPE {113}

A. - Microscopie électronique

Le cliché de la figure V.18 est un fond noir représentant l'intersection de deux macles (112) et (121) selon la direction $<\bar{3}11>$. L'angle de basculement est tel que la direction $<\bar{3}11>$ est parallèle au faisceau d'électrons. Les deux plans de macle sont donc vus debout et le cliché de diffraction correspondant permet de les identifier sans ambiguïté. La configuration T_C qui apparaît à l'intérieur de T_A est exactement symétrique de T_B dans le plan de la macle T_A. Cette photo suggère déjà sa nature : T_C est la macle secondaire image de T_B dans T_A. Nous allons donner les preuves expérimentales de cette hypothèse.

Les quatre cristaux T_A, T_B, T_C et M (la matrice) ont la direction $<\bar{3}11>$ en commun. Le cliché de diffraction photographié dans les conditions de la figure V.18 où $<\bar{3}11>$ est parallèle au faisceau d'électrons est donc constitué de quatre coupes {113} superposées. Le schéma de la figure V.19 montre comment ces coupes se déduisent les unes des autres par symétrie autour de l'axe [112] commun à deux d'entre elles. Le schéma est orienté de façon cohérente avec les différents clichés.

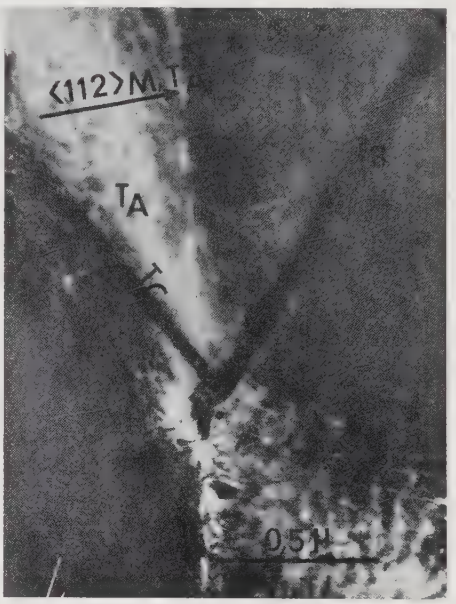


FIG. V.18
Microscopie électronique.
L'axe d'intersection $<\bar{3}11>$ est debout.

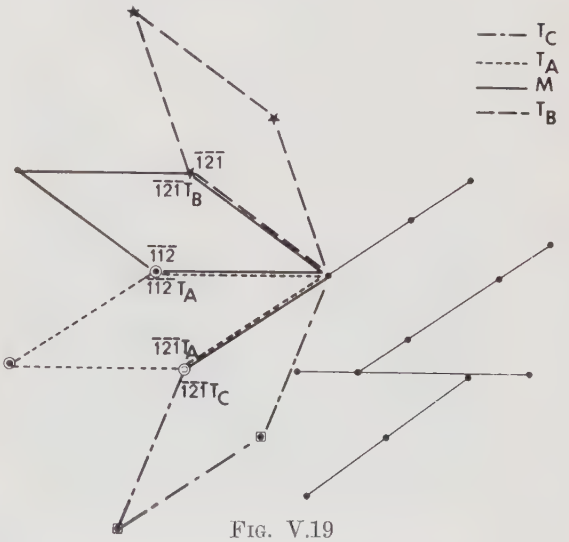


FIG. V.19
Schéma du cliché de diffraction avec $<\bar{3}11>$ debout.
Il y a 4 coupes {113} superposées.

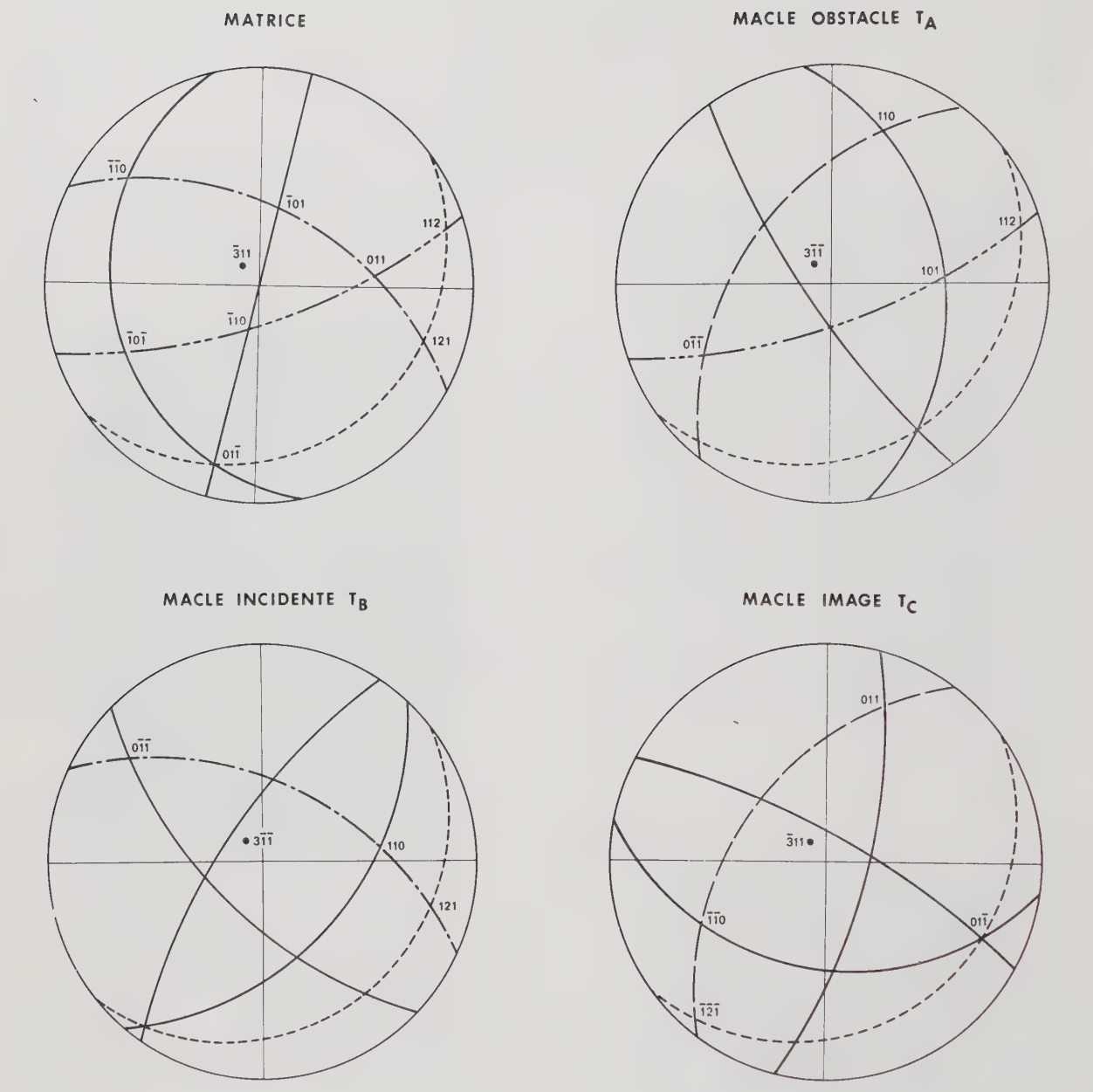


FIG. V.20

Projections stéréographiques des quatre cristaux.

— — - - — Zone {111} commune à M et T_A.
— - - — Zone {111} commune à M et T_B.
— — — Zone {111} commune à T_A et T_C.
- - - - - Zone correspondant à l'axe $<\bar{3}11>$ d'intersection des 2 macles.

Nous avons établi la projection stéréographique des quatre cristaux. Elles sont reproduites sur la figure V.20.

T_A et T_B sont en position de macle par rapport à M. Les trois cristaux ont donc une tache [110] commune — ici la tache $<011>_M$ (cf. chapitre IV.5 A *a*). Le fond noir correspondant à cette réflexion est donné sur la figure V.21 : T_A, T_B et M sont en contraste, T_C est hors contraste.

De la même façon M et T_C sont en position de macle par rapport à T_A. La figure V.22

donne le fond noir correspondant à la tache [110] que ces trois cristaux ont en commun. Il s'agit ici de la tache <011> T_A.

De même deux cristaux en position de macle ont trois taches [110] en commun. Ainsi :

- T_C est en position de macle par rapport à T_A : la figure V.23 montre un fond noir où T_C et T_A sont en contraste à l'exclusion de tous les autres cristaux.

— T_A est en position de macle par rapport à M. Le même raisonnement s'applique donc et l'exemple est donné sur la figure V.18.

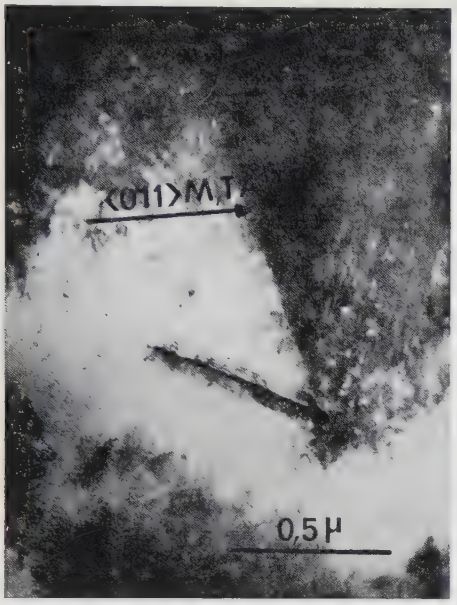


FIG. V.21
Microscopie électronique.
[110] de M, T_A, T_B.

FIG. V.22
Microscopie électronique.
[110] de M, T_A, T_C.

FIG. V.23
Microscopie électronique.
[110] de T_A et T_C.

FIG. V.24
Microscopie électronique.
[110] de M et T_B.

— T_B est en position de macle par rapport à M. L'illustration est donnée sur la figure V.24.

Ces différents clichés établissent les relations d'orientation que nous avons annoncées. Mais, afin de lever toute ambiguïté, nous avons pris un fond noir sur la tache $<001>_{T_C}$ spécifique de T_C (fig. V.25).

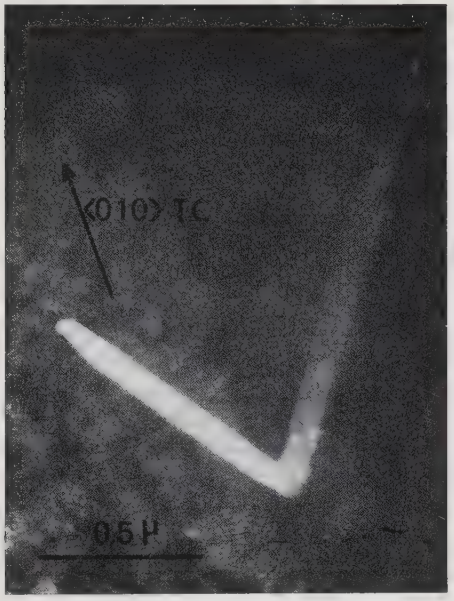


Fig. V.25
Microscopie électronique.
[100] de T_C.

B. - Microsocopie optique

L'aspect très caractéristique des croisements de type [113] en microscopie optique vient confirmer cette observation. Nous avons noté les caractéristiques suivantes :

1) Il apparaît le plus souvent une relaxation très importante dans la macle obstacle. Il s'agit d'une relaxation par glissement et non d'un maclage car la trace disparaît lors d'un polissage. Cette relaxation correspond à un glissement sur le plan $\{110\}_T$ qui contient l'axe [113] d'intersection (fig. V.26).

2) Dans ce cas un examen attentif montre qu'il existe une seconde trace plus ténue. Son orientation est toujours compatible avec l'orientation de la trace de la macle secondaire (fig. V.26).

3) Dans certains cas nous avons pu établir qu'il y a effectivement formation d'un embryon de macle secondaire. D'une part, une trace superficielle dont l'orientation est compatible avec la trace superficielle de la macle secondaire reste visible après polissage (fig. V.27). D'autre part, cette trace apparaît

Fig. V.26 (× 450)
Microscopie optique.
Aspect caractéristique du croisement $<\bar{3}11>$.

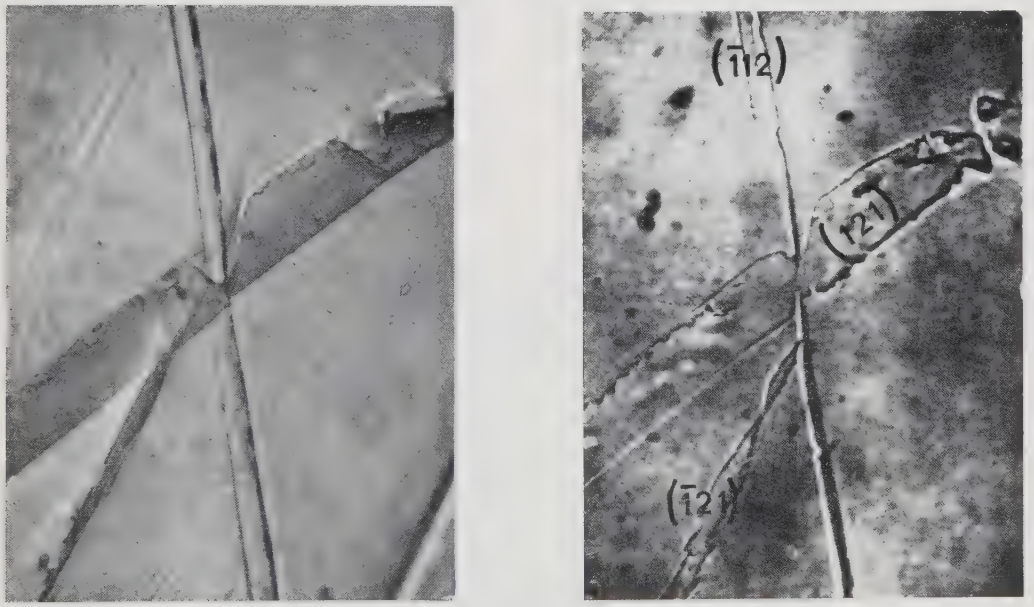
Fig. V.27 (× 450)
Microscopie optique.
La trace de la macle secondaire est visible après polissage.

A FIG. V.28 B (× 450)

Microscopie optique.

A - Avant polissage; B - Après polissage.

La configuration de la relaxation ne change pas, quel que soit le polissage.



A FIG. V.29 B (× 450)

Microscopie optique.

A - Avant polissage; B - Après polissage.

Les trois macles n'ont pas d'axe commun. La configuration évolue rapidement avec le polissage.

(121) et (1̄12) : intersection <1$\bar{1}$1>. (121) et (1̄21) : intersection <0$\bar{1}$2>.

(1̄21) et (112) : intersection <311>.

toujours à l'extrémité de la macle incidente, quel que soit le polissage (fig. V.28). Ceci établit que la trace est située dans un plan qui contient l'axe d'intersection des deux macles. Son plan est alors défini par deux droites. C'est le plan de la macle secondaire, A titre d'exemple nous montrons sur la figure V.29 l'évolution de la configuration des traces de trois macles avec le polissage. Les trois macles n'ont pas d'axe commun. La configuration évolue alors rapidement.

4) La configuration de relaxation dépend de la face d'impact sur la macle obstacle : la relaxation apparaît soit dans la matrice, soit dans la macle selon la face d'incidence. Des exemples de ce phénomène sont donnés sur la figure V.30.

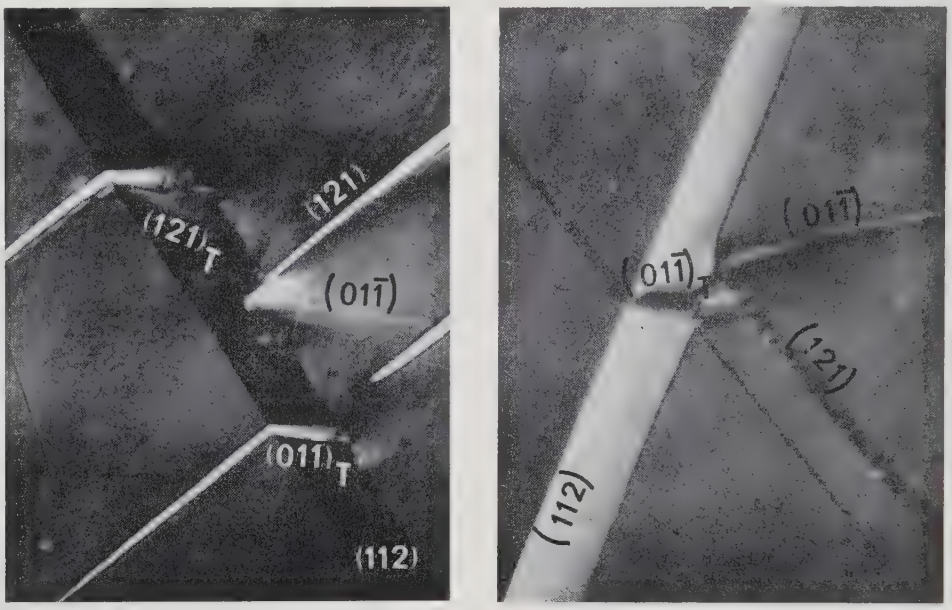


FIG. V.30 (× 450)

Microscopie optique.

Exemple de relaxations dissymétriques selon la face de l'impact.

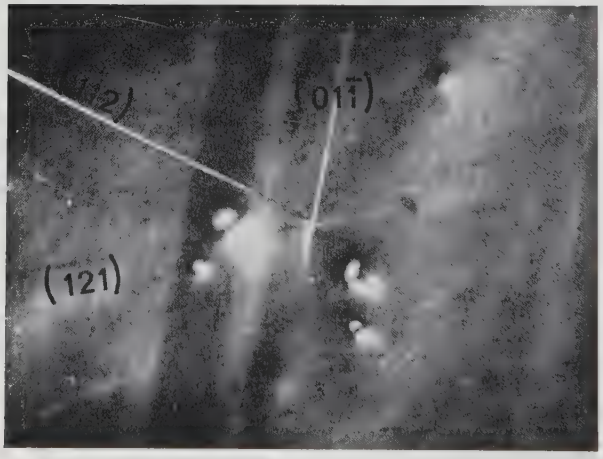


FIG. V.31 (× 450)

Microscopie optique.

Les émissaires des deux macles (112) et (121) ont réagi pour provoquer une relaxation sur le plan $(01\bar{1})_M$.

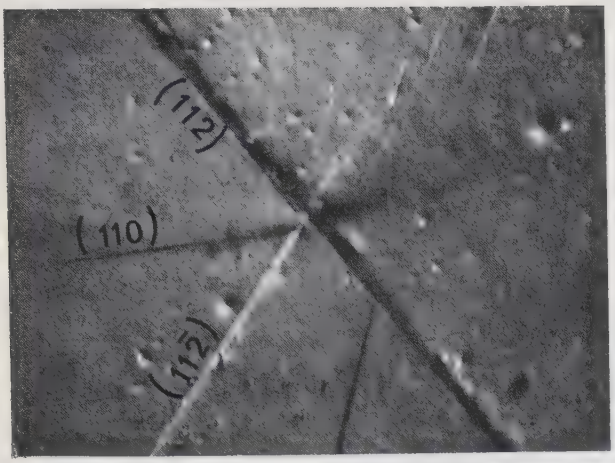


FIG. V.32 (× 450)

Microscopie optique.
Croisement <1$\bar{1}$0>. Il apparaît une relaxation sur le plan (110).

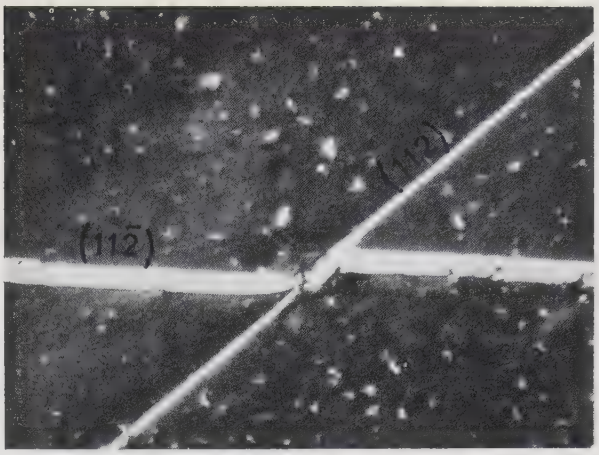


FIG. V.33 (× 450)

Microscopie optique.
Le croisement <1$\bar{1}$0> s'est fait complètement. Il n'est pas apparu de relaxations dans la matrice.

Enfin, nous avons pu observer la rencontre de deux macles selon un axe [113] sans que la macle se poursuive. Il est alors apparu une relaxation sur le plan {110} qui contient l'axe d'intersection (fig. V.31).

C. - Résumé des résultats

En résumé les observations faites, tant en microscopie optique qu'électronique, mon-

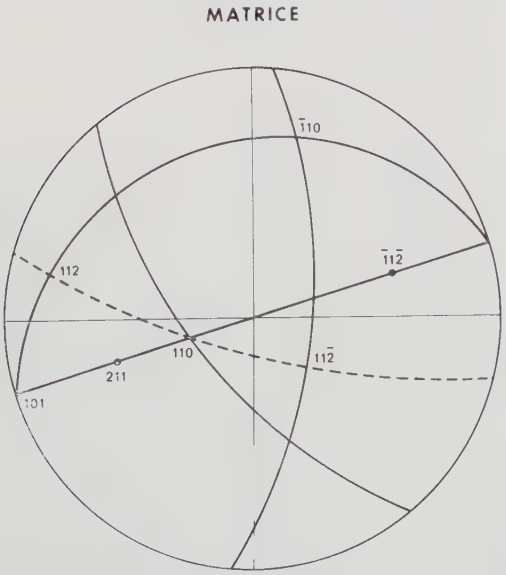


FIG. V.34

Projection stéréographique de la matrice.
------ Zone correspondant à l'axe <1$\bar{1}$0> d'intersection des deux macles.

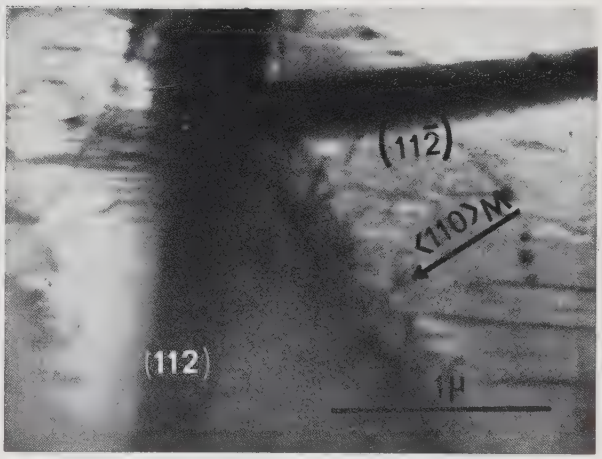


FIG. V.35

Microscopie électronique.
Le plan de relaxation est debout et normal à g. →
C'est le plan $(110)_M$.

trent que le croisement de type [113] provoque le plus souvent des relaxations dans la macle obstacle dues à :

1) La formation de la macle secondaire (ou d'une relaxation sur le plan correspondant).

2) L'apparition d'une relaxation très abondante sur le plan {110} de la macle qui contient l'axe d'intersection.

Enfin, le mécanisme de réaction semble dépendre de la face d'impact.

IV. — LE CROISEMENT DE TYPE [110]

La microscopie optique nous a permis d'établir que les macles peuvent se croiser sans s'arrêter et qu'il apparaît le plus souvent une relaxation abondante dans le plan {110} de la matrice qui contient l'axe d'intersection des deux macles. Ces résultats sont illustrés par les figures V.32 et V.33. Exceptionnellement le croisement peut se faire sans qu'il apparaisse de relaxation dans la matrice (fig. V.33).

La microscopie électronique vient confirmer ces résultats. Le croisement [110] est caractérisé par l'apparition d'une relaxation par glissement très abondante dans la matrice. Nous avons représenté sur la figure V.34 la projection stéréographique de la matrice où les deux macles (112) et $(11\bar{2})$ se coupent selon l'axe $<1\bar{1}0>$. Pour établir que la relaxation a lieu dans le plan $(110)_M$ nous avons mis ce plan en position de réflexion de Bragg. La trace de la relaxation apparaît alors fine et exactement normale à $\vec{g}$ (fig. V.35).

La figure V.36 a été prise avec la tache $<1\bar{1}0>_M$ commune aux deux macles et à la matrice. Les dislocations émissaires des deux macles sont alors hors contraste (voir chapitre IV, paragraphe 5. A *b*). La relaxation observée correspond donc à une réaction et non à une déviation des dislocations émissaires de l'une ou l'autre macle. Il y a visiblement deux familles de dislocations sur cette figure. Nous avons pu identifier le vecteur de Bürgers des longues dislocations rectilignes en les mettant hors contraste pour :

$$\vec{g} = <101>_M \text{ (fig. V.37)}$$

$$\vec{g} = <211>_M \text{ (fig. V.38)}$$

$$\text{et } \vec{g} = <1\bar{1}2>_M \text{ (fig. V.39).}$$

Il s'agit de $b = 1/2\ <111>$.

Un deuxième exemple d'intersection est donné sur la figure V.40. Le cliché a été pris en deux ondes sur la tache $<1\bar{1}0>_M$ commune

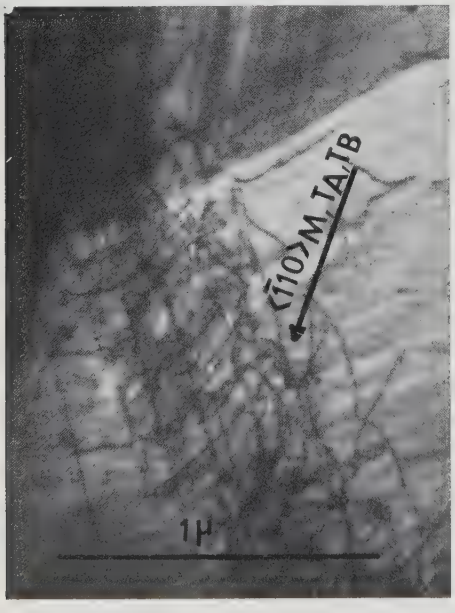


FIG. V.36

Microscopie électronique.
La tache de diffraction est commune à M, T_A et T_B.
Les émissaires sont donc hors contraste.

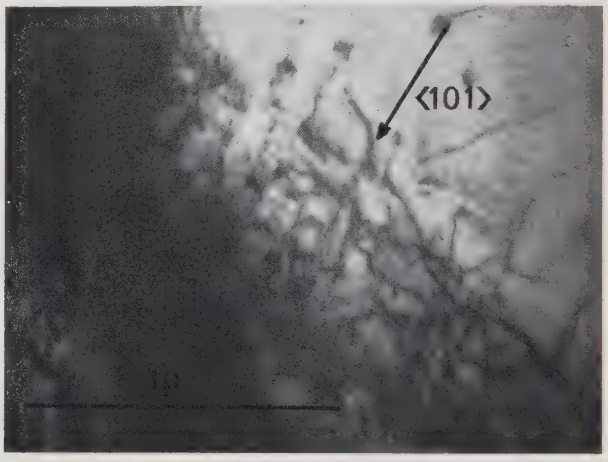


FIG. V.37

Microscopie électronique.
Extinction des dislocations longues.

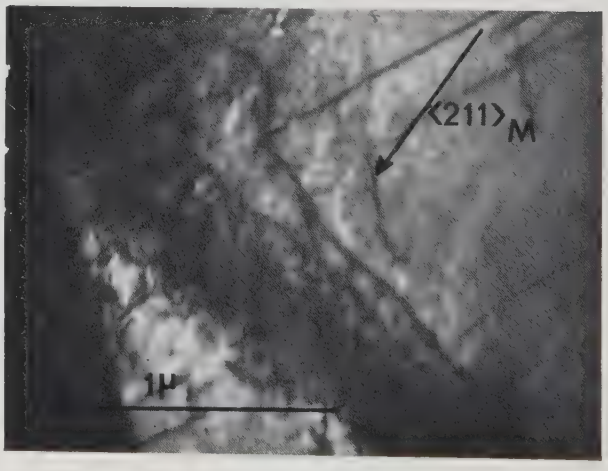


FIG. V.38

Microscopie électronique.
Extinction des dislocations longues.

aux deux macles et à la matrice. On voit ici encore des dislocations en contraste qui ne peuvent pas être des émissaires (nous avons pu établir que les grandes traces visibles sur la figure V.40 correspondent au contraste résiduel des dislocations de type 1/2 $<11\bar{1}>$, c'est-à-dire des dislocations du même type que les émissaires de l'une des macles).

En conclusion, nous avons montré que le croisement de type [110] est caractérisé par une importante relaxation par glissement sur le plan $\{110\}_M$ qui contient l'axe d'intersection. Les dislocations qui participent à cette relaxation ne sont pas les dislocations émissaires des macles. La relaxation semble plus abondante si le croisement total n'a pas lieu.

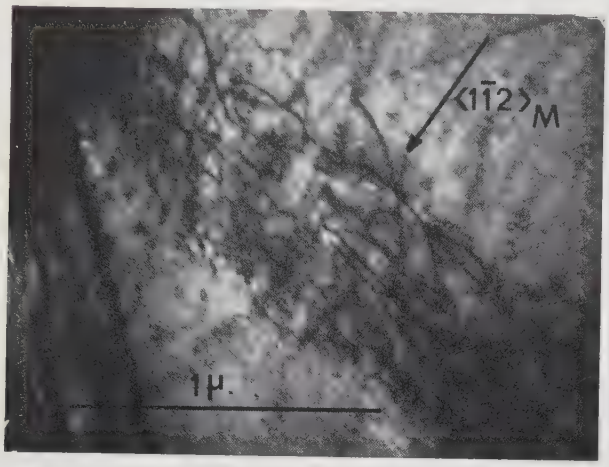


Fig. V.39

Microscopie électronique.
Extinction des dislocations longues.

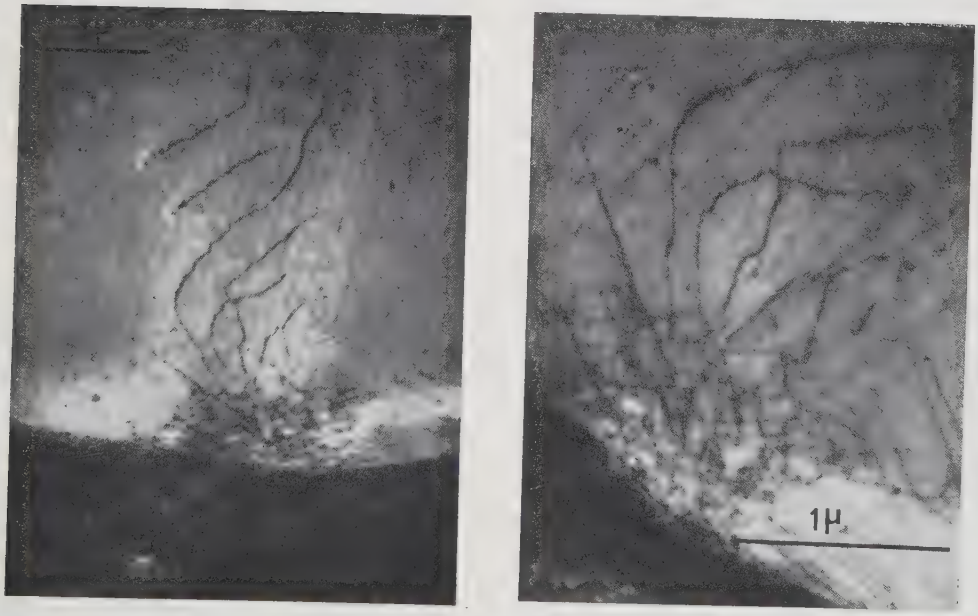


Fig. V.40

Microscopie électronique.
Deuxième exemple d'intersection [110] avec relaxation dans la matrice. Les conditions de diffraction mettent les émissaires hors contraste.

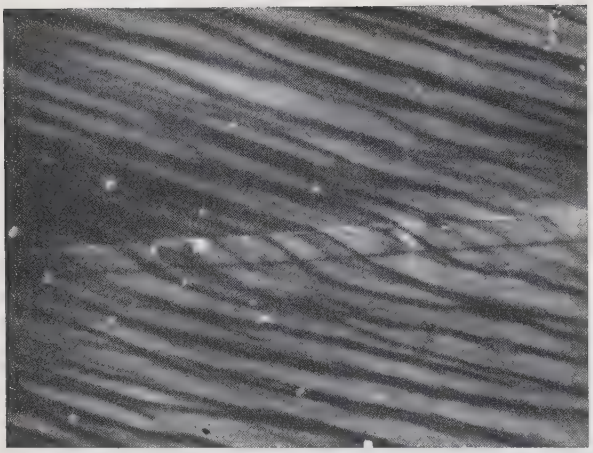


FIG. V.41 (× 450)
Microscopie optique.
Les dislocations traversent la macle : $\vec{b}$ est parallèle à la direction de cisaillement de la macle. Noter la déviation des traces.

FIG. V.42 (× 600)
Microscopie optique.
Les dislocations ne traversent pas : $\vec{b}$ n'est pas parallèle à la direction η_1 de la macle. Noter que le glissement a lieu préférentiellement dans un sens.

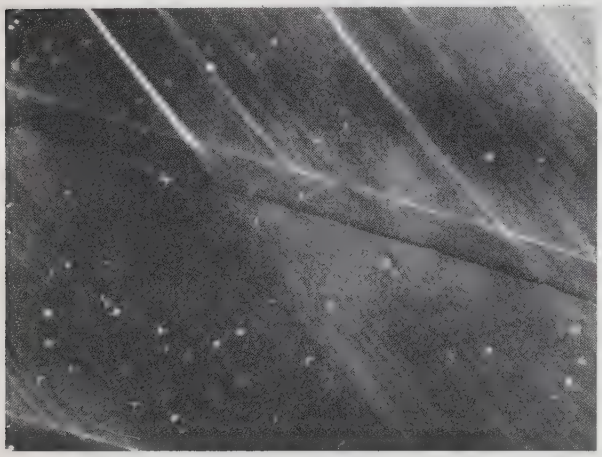


FIG. V.43 (× 450)
Microscopie optique.
Si on poursuit la déformation les lignes de glissement finissent par franchir le joint de macle.

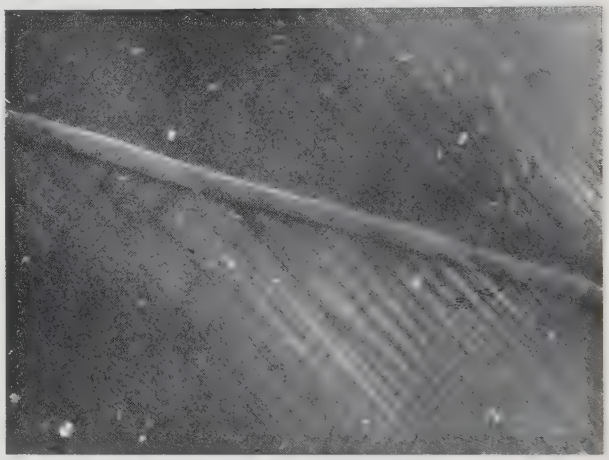


FIG. V.44 (× 450)
Microscopie optique.
Deux systèmes de glissement : l'un traverse la macle, l'autre pas.

FIG. V.45 (× 450)
Microscopie optique.
Interaction d'une macle avec un sous-joint.

FIG. V.46 (× 450)
Microscopie optique.
Interaction d'une macle avec un joint de grain.

V. — INTERACTION DISLOCATIONS-MACLES

Nous avons regardé comment des lignes de glissement peuvent, à température ambiante, traverser des macles mécaniques. Nous avons établi que :

1) Les lignes de glissement traversent facilement une macle si le vecteur de Bürgers des dislocations qui les engendrent correspondent au vecteur de cisaillement de la macle obstacle. Un exemple caractéristique est donné sur la figure V.41. On notera que les lignes de glissement apparaissent déviées dans la macle obstacle.

2) Elles butent sans pouvoir traverser si leur vecteur de Bürgers n'est pas le vecteur de cisaillement de la macle obstacle (fig. V.42).

3) Dans ce dernier cas, si on poursuit la déformation les joints de macle, comme les joints de grains, deviennent « perméables » aux lignes de glissement (fig. V.43).

La figure V.44 résume parfaitement la situation : il est apparu deux systèmes de glissement. La macle est « perméable » pour l'un, « imperméable » pour l'autre.

VI. — INTERACTION MACLES-JOINTS DE GRAIN

Nous avons enfin fait quelques observations sur l'interaction macles-joints de grain. Il faut toujours conserver le cisaillement. Il y a en gros, deux types de solutions :

1) Le joint est à faible désorientation : la macle n'est pratiquement pas déviée. On « absorbe » les cisaillements excédentaires par des glissements (fig. V.45).

2) Le joint est à forte désorientation : la macle incidente crée une ou plusieurs familles dans le grain voisin. Il apparaît également des glissements pour « ajuster » les cisaillements (fig. V.46).

CHAPITRE VI

Interprétation - Discussion

I. — INTRODUCTION

Nous avons présenté dans le chapitre III les hypothèses que nous avons posées à la suite de tous les auteurs ayant abordé des problèmes semblables. Ce sont :

1) Des restrictions géométriques sur les plans de relaxation. Ils doivent obligatoirement contenir l'axe d'intersection des deux macles sécantes.

2) La conservation du cisaillement provoqué par la macle incidente.

Les résutats obtenus au chapitre V confirment déjà la première hypothèse. Tous les plans de relaxation observés contiennent l'axe d'intersection des macles (ceci est bien illustré par les clichés pris avec l'axe d'intersection debout).

Ce chapitre va nous permettre d'examiner dans quelle mesure la seconde hypothèse est respectée.

II. — LE CROISEMENT DE TYPE [111]

Le plus souvent, dans les intersections de ce type, les deux macles s'annihilent l'une l'autre sans qu'apparaissent de relaxations ni dans la matrice, ni dans les macles. Les cisaillements des deux macles sont opposés et peuvent s'annihiler. On peut décrire le phénomène par la réaction entre émissaires :

$$1/2\ \langle 111\rangle_M + 1/2\ \langle \bar{1}\bar{1}\bar{1}\rangle_M \rightarrow 0$$

Quelquefois le croisement complet a lieu. Dans ce cas la macle incidente semble être déviée dans la macle obstacle et la partie commune aux deux macles semble se « démacler ». Cahn a proposé une interprétation de ce phénomène [13]. On peut raisonner de façon plus précise grâce à la figure VI.1. Nous avons représenté sur la figure VI.1 A le sens de cisaillement correspondant aux trois macles $(11\bar{2})$, $(1\bar{2}1)$ et $(\bar{2}11)$ de la zone $\langle 111\rangle$. Chaque plan est repéré par sa normale positive et le vecteur debout indique le sens du cisaillement

de la portion de cristal située du côté de la normale positive. La figure VI.1 B donne les sens de cisaillement avec les mêmes hypothèses mais dans l'une des macles de la zone. La figure VI.1 C montre enfin comment une macle incidente peut poursuivre son cisaillement dans la macle obstacle. Il y a deux plans {112} possibles repérés par 1 et 2. Par comparaison avec VI.2 B on voit que le trajet 1 (qui correspond à une déviation) engendre une macle dans la macle (on revient donc à l'orientation de la matrice) alors que le trajet 2 ne correspond à aucune structure (on peut montrer que l'incorporation des partielles sans déviation amènerait tous les atomes sur des plans du même type).

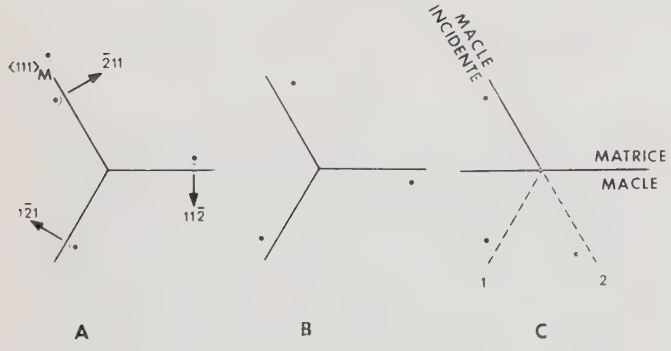


FIG. VI.1

A - Cisaillement correspondant aux macles dans la matrice.

B - Cisaillement correspondant aux macles dans la macle.

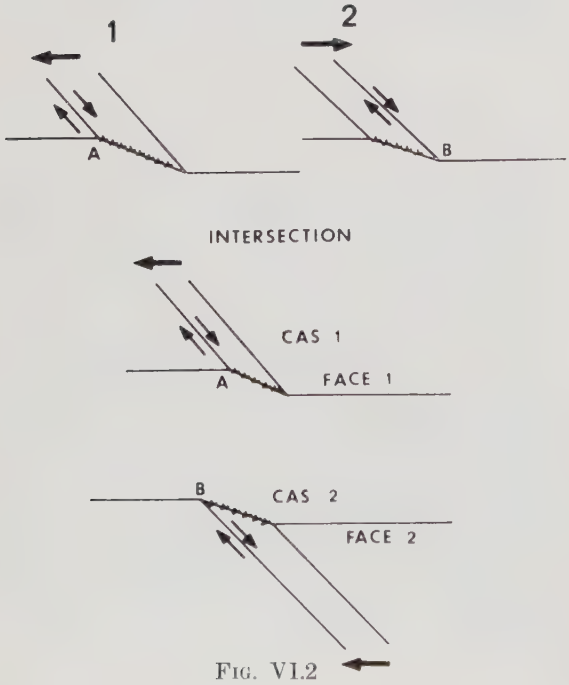


FIG. VI.2

Il faut insister sur le fait que cette interprétation, équivalente à celle proposée par Cahn, suppose que ce sont les dislocations partielles elles-mêmes qui s'incorporent. Il n'y a aucune difficulté de principe à ce que les émissaires s'incorporent en suivant le trajet 1 ou le trajet 2 (ou le trajet correspondant à un plan $\{110\}_T$ de la zone $<111>$) car le passage d'une dislocation parfaite ne modifie pas la structure.

III. — GÉNÉRALITÉS SUR LES AUTRES TYPES DE CROISEMENT

Tous les autres types d'intersection échappent à l'analyse de Cahn : le vecteur de cisaillement de la macle incidente n'est pas parallèle au plan de composition de la macle obstacle. La transformation du vecteur de Bürgers des émissaires de la macle incidente se fait selon l'équation

$$1/2\ [111]_M \rightarrow 1/6\ [115]_T$$

Le vecteur transformé n'est pas un vecteur de dislocation parfaite dans la macle. Il faut le décomposer si on veut l'exprimer en fonction de dislocations de la macle. La caractéristique de tous ces croisements sera donc qu'ils feront appel à des réactions plus ou moins complexes (en ce sens qu'elles font intervenir un nombre plus ou moins grand de dislocations).

Une autre caractéristique est que l'incorporation de la dislocation émissaire va créer une marche sur le plan (112) de la macle obstacle. Nous avons montré en annexe D que les réactions écrites laissent toujours sur ce plan de la macle les partielles qui peuvent border le joint de macle incohérent formé. Le seul problème qui se pose est celui de la stabilité de ce joint incohérent.

Supposons que la décomposition du vecteur $1/6\ [115]_T$ se fasse toujours selon le même type de réaction. On va former sur la face d'incidence de la macle obstacle un empilement de dislocations partielles toutes du même signe. Nous pourrons distinguer deux cas selon que cet empilement peut se relaxer ou non. Les deux cas sont représentés sur la figure VI.2. La flèche indique le sens d'épaississement de la macle incidente. On suppose

que la réaction a déjà commencé et que la situation est celle représentée sur la figure. La macle incidente est déjà partiellement incorporée. On s'intéresse alors à la réaction qui se produit lorsqu'une nouvelle dislocation émissaire arrive en A (cas 1) ou en B (cas 2).

1) *Cas n° 1.* — La parfaite émissaire arrive en A où elle crée une dislocation partielle qui borde la marche créée. Cette partielle ne peut que glisser vers la droite pour provoquer le maclage et « effacer » la marche. Mais la configuration est telle qu'elle est bloquée dans son glissement par la macle incidente. Si les réactions d'incorporation sont toutes du même type on va créer un joint incohérent de forte énergie entièrement bloqué. C'est un cas où il y a accumulation de vecteurs de Bürgers sur la face d'incidence et où le cisaillement global n'est pas conservé. Cette situation est peu probable énergétiquement. Notons encore que, dans cette configuration, les relaxations auront lieu préférentiellement dans la macle obstacle, car la macle incidente sert d'écran entre le lieu de réaction A et la majeure partie de la matrice.

2) *Cas n° 2.* — La parfaite incidente arrive en B. Il n'y a pas d'obstacle au glissement vers la droite de la parfaite formée lors de l'incorporation. Il n'y a pas accumulation de vecteur de Bürgers et donc le cisaillement global est conservé. Dans ce cas on peut s'attendre à observer des relaxations dans la matrice, car la macle incidente n'écrante qu'une faible partie de celle-ci.

Remarquons enfin que, si on se donne un sens de croissance déterminé pour un type de macle donné, on observera une géométrie de type 1 ou 2 selon la face d'incidence sur une même macle obstacle (voir l'exemple de la figure VI.2). On peut donc s'attendre, dans ce cas, à une dissymétrie des réactions d'incorporation selon la face d'incidence.

IV. — LE CROISEMENT DE TYPE [210]

A. - Avec relaxation sur le plan $(100)_T$ (fig. V.8)

L'analogie avec les observations de microscopie optique qui nous a permis de décider sur la fig. V.8 que B est la macle incidente et A la macle obstacle nous indique également dans quel sens le croisement a eu lieu. Les relaxations vont en divergeant à partir du point d'impact P.

Les réactions d'incorporation des dislocations émissaires de B sont :

type 1 :

$$1/2\ <1\bar{1}1>_M \rightarrow 2/6\ <1\bar{1}1>_T + 1/2\ <\bar{1}11>_T$$

type 2 :

$$1/2\ <1\bar{1}1>_M \rightarrow 1/6\ <1\bar{1}\bar{1}>_T + <010>_T$$

Nous pouvons maintenant interpréter les relaxations observées : la relaxation sur le plan $(100)_T$ correspond au glissement de la dislocation $<010>_T$ (réaction type 2), la relaxation $(312)_T$ correspond au glissement de la dislocation $1/2\ <\bar{1}11>_T$ (réaction type 1) : les plans de glissement observés sont exactement ceux qu'on pouvait prévoir à priori à partir de la forme des réactions de type 1 et 2.

Revenons à la figure V.8. Nous pouvons constater que :

— l'émergence sous forme de macle n'a lieu qu'à l'extrémité du glissement $(100)_T$;

— la macle émergente a une largeur qui est seulement égale aux 2/3 de la macle incidente:

— la macle obstacle est cisaillée : le cisaillement du plan de la face d'incidence est égal au cisaillement du plan de la face d'émergence. Ce cisaillement correspond au tiers de l'épaisseur de la macle incidente.

Cette dernière remarque indique que les partielles formées lors de l'incorporation n'ont pas pu glisser en effaçant la marche formée. La géométrie de l'incorporation correspond donc au cas n° 1 de la figure VI.2.

Si l'incorporation avait eu lieu selon des réactions toutes du même type, il se serait formé un empilement de dislocations partielles de grande énergie (de plus, il y aurait eu accumulation de vecteur de Bürgers et le cisaillement n'aurait pas été conservé). L'expérience prouve qu'il est apparu deux types de réactions. L'analyse de l'émergence à l'extrémité du glissement $(100)_T$ nous montre que ce plan a retransmis les 2/3 du cisaillement global incident. Le dernier tiers a donc été transmis par le glissement $(312)_T$. On compte deux réactions de type 2 pour une réaction de type 1. Cette proportion permet d'aboutir au schéma du joint de macle incohérent proposé

par Sleeswyk. Comme elle est respectée, la somme des vecteurs de Bürgers des dislocations partielles formées lors de l'incorporation est nulle.

Examinons maintenant le cisaillement de A. Le cisaillement de la face d'incidence est celui qu'on attend. Il faut trois partielles pour former une émissaire. Chaque émissaire provoque le décalage d'un plan (112) sur le plan d'incidence. Le cisaillement maximum observable (qui correspond au cas où le joint incohérent formé est totalement bloqué, voir figure VI.2, cas n° 1), correspond donc bien au tiers de l'épaisseur de la macle incidente. C'est ce que nous avons pu observer.

L'émergence des dislocations parfaites créées lors de l'incorporation pose un problème. Leur glissement se fait sans qu'apparaissent de macles (ce sont des dislocations parfaites). Il ne peut donc y avoir aucun obstacle au glissement des partielles qui se forment sur la face d'émergence. Cette face ne devrait donc pas apparaître cisaillée.

Mais on peut remarquer que l'émergence se décrit avec des réactions symétriques de l'incidence, à savoir :

Type 1 :

$$1/2\ \langle \bar{1}1\bar{1}\rangle_T \rightarrow 1/2\ \langle 1\bar{1}1\rangle_M + 2/6\ \langle 11\bar{1}\rangle_M$$

Type 2 :

$$\langle 010\rangle_T \rightarrow 1/2\ \langle 1\bar{1}1\rangle_M + 1/6\ \langle \bar{1}\bar{1}\bar{1}\rangle_M$$

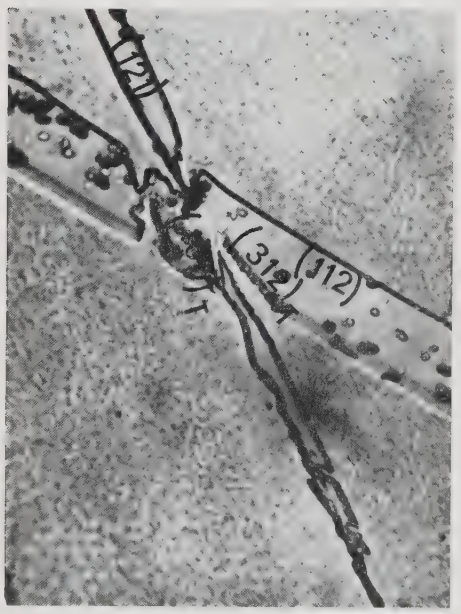


FIG. VI.3 (× 450)
Microscopie optique.

On note alors que les partielles formées sont de signe contraire et s'attirent. On note, en effet, sur la figure V.8 que la macle A est partiellement démaclée entre les deux relaxations $(100)_T$ et $(312)_T$ et qu'il s'est formé un joint de macle incohérent.

Les observations de microscopie optique indiquent que ce mécanisme de croisement est très général : nous avons déjà signalé qu'on peut mettre en évidence les deux relaxations $(100)_T$ et $(312)_T$. A titre de preuve supplémentaire nous montrons sur la figure VI.3 l'aspect d'un croisement de ce type observé après polissage. L'émergence a eu lieu à l'extrémité du glissement $(100)_M$ sous forme de macle mais une partie du cisaillement a été perdue. Il y a également démaclage et formation d'un joint incohérent entre les deux relaxations $(100)_T$ et $(312)_T$. Enfin, la macle obstacle conserve sa largeur de part et d'autre du croisement, mais elle a été cisaillée par la macle incidente.

B. — Avec relaxation sur le plan de la macle secondaire

(fig. V.4, 5, 6)

L'autre mode de croisement (observé en microscopie électronique) a donné lieu à deux relaxations : l'une dans la macle (sur le plan de la macle secondaire), l'autre dans la matrice.

Une seule réaction du type 2 rend compte de ces relaxations :

$$1/2\ \langle 1\bar{1}\bar{1}\rangle_T \rightarrow 1/6\ \langle \bar{1}\bar{1}1\rangle_M + 1/2\ \langle \bar{1}1\bar{1}\rangle_T + 1/2\ \langle 111\rangle_M$$

$1/2\ \langle \bar{1}11\rangle_T$ est la dislocation émissaire de la macle secondaire image.

$1/2\ \langle 111\rangle_M$ peut glisser dans le plan $(\bar{3}12)_M$ qui a effectivement été identifié.

Il est difficile de pousser plus loin l'interprétation faute de plus nombreuses observations. Cependant on peut remarquer que la relaxation a été possible dans la matrice. Ceci suggère que le sens de croissance de la macle incidente correspond au cas n° 2 de la figure VI.2. Dans ces conditions le joint incohérent peut glisser, il ne se produit aucune accumulation de vecteur de Bürgers, même si c'est toujours la même réaction qui se produit.

V. — LE CROISEMENT [113]

A. - Avec formation de la macle image (fig. V.18, 19, 20).

Les observations de microscopie optique et électronique nous ont permis de montrer que, le plus souvent, la réaction d'incorporation se fait avec :

1) une relaxation importante sur le plan $\{110\}_T$ qui contient l'axe d'intersection;

2) une relaxation plus ténue sur le plan de la macle image (que nous avons cependant pu identifier de façon formelle);

3) un cisaillement sensible de la macle obstacle.

La dernière remarque nous indique que la géométrie de l'intersection est celle du cas n° 1 de la figure VI.2. Il faut donc calquer l'interprétation sur celle donnée pour le croisement [210] quand il apparaît une relaxation sur le plan $\{100\}_T$.

Les réactions possibles sont :

Type 1 :

$$1/2\ \langle 1\bar{1}1\rangle_M \rightarrow 1/2\ \langle \bar{1}11\rangle_T + 2/6\ \langle 11\bar{1}\rangle_T$$

Type 2 :

$$1/2\ \langle 1\bar{1}1\rangle_M \rightarrow 1/2\ \langle 111\rangle_T + 1/2\ \langle 111\rangle_T + 1/6\ \langle \bar{1}\bar{1}1\rangle_T$$

Pour la réaction de type 2 nous avons choisi une forme décomposée afin de faire intervenir la dislocation émissaire caractéristique de la macle secondaire image.

On peut prévoir les plans de relaxation actifs pour les dislocations parfaites formées: ce sont, outre le plan de la macle secondaire, le plan $(01\bar{1})_T$ aussi bien pour la dislocation de la réaction de type 1 que pour la deuxième dislocation due à la réaction de type 2.

On voit ici la limite de l'analyse des traces: les réactions de types 1 et 2 engendrent toutes deux une parfaite dont le plan de glissement est $(01\bar{1})_T$. Il faudrait étudier la part de chacun de ces vecteurs de Bürgers dans les enchevêtrements formés pour décider la part de chaque type de réaction. La complexité des écheveaux est telle que cette étude semble présenter des difficultés insurmontables.

On peut cependant penser que les réactions de types 1 et 2 se sont équilibrées pour que la somme des vecteurs de Bürgers des partielles laissées lors de l'incorporation soit nulle. Ceci permet d'expliquer pourquoi la relaxation sur le plan $(01\bar{1})_T$ est beaucoup plus importante que la réaction sur $(121)_T$ (la première apparaît pour tous les types de réaction, la deuxième seulement pour les réactions de type 2).

B. — Incorporation dissymétrique (fig. V.30)

C'est dans le cas du croisement [311] que nous avons mis en évidence le fait que le mécanisme d'incorporation dépend de la face d'incidence. Nous avons déjà expliqué ce phénomène au paragraphe III de ce chapitre. Si la géométrie est celle du cas 2 de la figure VI.2 les relaxations sont possibles dans la matrice. De plus, il n'y a pas accumulation de dislocations partielles, car le joint incohérent formé lors de l'incorporation des émissaires de la macle incidente peut glisser.

L'interprétation que nous proposons pour l'incorporation dissymétrique appelle quelques commentaires. Supposons qu'une macle prenne naissance entre deux macles obstacles de même type. Elle présentera automatiquement une configuration d'intersection avec l'une des macles obstacle, l'autre configuration avec l'autre. On observe effectivement dans ce cas que les deux incorporations ne sont pas symétriques. Il semble que dans nos observations le type de réaction dépende effectivement de la face d'incidence sur la macle obstacle. Si c'est le cas, cela indique que le sens d'épaississsement des macles est toujours le même.

VI. — LE CROISEMENT [110]

A. - Sans relaxation dans la matrice

Si la relaxation n'est pas possible dans la matrice, c'est que les partielles formées lors de l'incorporation sont bloquées. Nous pouvons reprendre les modèles précédents pour aboutir à la formation d'un joint incohérent de basse énergie. Les réactions s'écrivent :

Type 1 :

$$1/2\ \langle 111\rangle_M \rightarrow 2/6\ \langle \bar{1}\bar{1}1\rangle_T + 1/2\ \langle 111\rangle_T$$

Type 2 :

$$1/2\ \langle 111\rangle_M \rightarrow 1/6\ \langle 11\bar{1}\rangle_T + \langle 001\rangle_T$$

Il y a une difficulté supplémentaire ici : chaque incorporation de parfaite crée le décalage de deux plans (112) qu'il faut donc border de 2 partielles convenables :

$$2 \times 1/6 <\bar{1}\bar{1}1>.$$

La réaction de type 2 crée seulement $1/6 <11\bar{1}>$: c'est la même faute. La difficulté vient de ce que cette partielle doit limiter deux plans (112). On voit sur la figure VI.4 comment on peut aboutir à la formation du joint incohérent stable tel que l'a décrit Sleeswyk. On est parti d'une somme de b nulle, on aboutit à une somme de b nulle. La somme des b qui interviennent dans les réactions est donc nulle et les réactions écrites ne sont que des réarrangements locaux qui n'exigent pas ou peu d'énergie.

liser un joint d'énergie nulle avec uniquement des réactions de type 2, mais en faisant une incorporation mixte sur deux.

Les formules ci-dessus montrent que les dislocations parfaites créées dans la matrice ne correspondent aux dislocations émissaires d'aucune des deux macles. Nous avons, en effet, montré expérimentalement que ces dislocations de relaxation restent visibles alors que le cliché est pris dans des conditions où les émissaires sont hors contraste (chapitre V, paragraphe 4).

Soulignons que les réactions écrites sont de type 2. Elles font donc intervenir des dislocations de Cottrell $b = [100]$. Nous n'avons observé que les dislocations parfaites issues de la décomposition de cette dislocation [100], mais nous verrons dans le chapitre VII

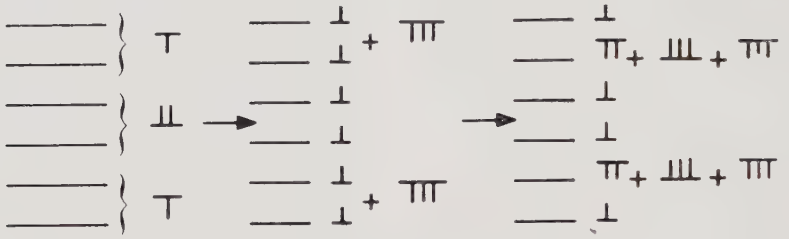


FIG. VI.4
Réactions permettant de stabiliser le joint incohérent (cas du croisement [110]).

B. - Avec relaxation dans la matrice

Les observations tant en microscopie électronique qu'en microscopie optique indiquent que, dans le cas général, il y a relaxation dans la matrice avec création de dislocations qui ne sont pas des émissaires de l'une ou l'autre macle.

Les réactions justifiant ces dislocations sont de type 2 avec incorporation mixte :

$$1/2 <111>_M \rightarrow 1/6 <11\bar{1}>_M + 1/2 <1\bar{1}1>_M + 1/2 <1\bar{1}1>_T$$

$$1/2 <111>_M \rightarrow 1/6 <11\bar{1}>_M + 1/2 <\bar{1}11>_M + 1/2 <\bar{1}11>_T$$

Comme il y a relaxation possible dans la matrice, le joint incohérent peut glisser. On peut remarquer, d'autre part, qu'on peut réaque, au moment de l'impact, elle décrit correctement l'état des contraintes. Nous verrons alors quelles conséquences en tirer pour l'initiation du clivage.

VII. — INTERACTION MACLES-DISLOCATIONS

Nous avons pu distinguer deux cas :

1) Le vecteur de Bürgers de la dislocation est parallèle au vecteur η_1 de la macle obstacle. Dans ce cas l'incorporation se fait sans difficulté selon la réaction

$$1/2 [111]_M \rightarrow 1/2 [111]_T$$

et les lignes de glissement traversent la macle.

2) Le vecteur de Bürgers de la dislocation n'est pas parallèle au vecteur η_1 de la macle

obstacle. Dans ces conditions l'incorporation ne se fait pas car la réaction :

$$1/2\ [111]_M \rightarrow 1/6\ [115]_T \rightarrow 2 \times 1/6\ [111]_T + 1/2\ [111]_T$$

exige trop d'énergie.

Nous pouvons faire deux remarques sur ces observations :

1) Dans le cas de la traversée facile on voit que les lignes de glissement sont déviées dans la macle obstacle (fig. V.41). La seule chose qui soit différente quand la dislocation se trouve dans la macle, c'est la position des plans de macles « favorables ». Ainsi la macle apparaît dans la matrice en relaxant la contrainte appliquée mais la transformation inverse qui ferait passer de la macle à la matrice ne relaxe pas la contrainte.

2) Dans le cas de la traversée impossible on observe quelquefois une dissymétrie autour de l'obstacle (fig. V.42 et V.43). Les lignes viennent buter d'un côté et non de l'autre. Ceci indique que les lignes de glissement progressent principalement dans un sens, ce qui permet de déterminer le signe du vecteur de Bürgers majoritaire (au moins à proximité de la surface).

VIII. — CONCLUSIONS GÉNÉRALES

A. - Les plans de relaxation contiennent l'axe d'intersection

Le chapitre V nous a permis de montrer que le plan de glissement doit toujours contenir l'axe d'intersection. Ceci peut expliquer pourquoi les lignes de glissement de relaxation observées en microscopie optique sont remarquablement rectilignes (elles sont beaucoup plus droites que les lignes de glissement ordinaires obtenues à même température). La réaction se produit tout le long de l'axe d'intersection et engendre certaines dislocations qui commencent à glisser. Au départ le plan de glissement est parfaitement défini. Le glissement dévié ne pourra intervenir que si la dislocation se met en position vis dans son premier plan de glissement. La première partie de la relaxation doit donc toujours être très rectiligne.

Le fait qu'en microscopie électronique les glissements paraissent un peu moins rectilignes n'infirme pas la conclusion. Par cette technique on n'observe que les quelques dislocations qui sont restées bloquées alors que la majorité a glissé pour former les lignes de glissement qu'on observe en microscopie optique. Les dislocations restées *in situ* peuvent interagir avec les dislocations d'écrouissage qui modifient légèrement la configuration observée. Les observations de microscopie optique prouvent que les dislocations d'écrouissage ne jouent aucun rôle dans les relaxations observées (la configuration ne dépend pas de l'état de déformation de la matrice). Elles ne peuvent que modifier légèrement la configuration des quelques dislocations qui n'ont pas glissé.

B. - Les réactions font intervenir des dislocations [100] Le glissement peut avoir lieu sous cette forme

La même remarque peut expliquer le glissement de la dislocation $[100]_T$ que nous avons observé dans le croisement [210]. Cette dislocation, qui n'a jamais été mise en évidence, n'est sans doute pas stable statiquement. Mais ici, quand elle se forme, elle a un plan de glissement facile disponible $\{100\}_T$ et on peut imaginer qu'elle reste stable dans des conditions dynamiques le temps de traverser la macle obstacle. D'autre part, il est vraisemblable que, dans le plan de glissement $\{100\}_T$ la dislocation [100] tend à prendre une configuration favorable en s'alignant dans une direction déterminée pour se dissocier. Si c'est le cas, la dislocation émergera avant de se dissocier parce que l'épaisseur de la macle obstacle est très faible devant la longueur sur laquelle a lieu la réaction (il ne peut exister dans la macle obstacle que des dislocations parallèles à l'axe [210] d'intersection).

C. - Le cisaillement se conserve

Nous avons montré au cours de ce chapitre qu'il n'est pas possible d'accumuler des dislocations de même signe sur la face de réaction. Ou bien le glissement du joint incohérent est possible et on peut observer que l'incorporation se fait selon une réaction de type unique. Ou bien il est bloqué et les réactions de différents types s'équilibrent pour que la somme des vecteurs de Bürgers laissés sur le plan d'incorporation soit nulle.

CHAPITRE VII

Application à la rupture par clivage - Conclusion

I. — APPARITION DE LA DISLOCATION DE COTTRELL b = [100]

Nous avons montré au chapitre précédent que les réactions de type 2 interviennent pour l'incorporation d'au moins les 2/3 du cisaillement. Pour les intersections de type [110] ou [113] les réactions sont de type 2 *a* ou 2 *b* *, c'est-à-dire qu'elles ne font intervenir que des dislocations parfaites 1/2 [111] ou des dislocations de macle (la dislocation de Cottrell y est dissociée). Le croisement [210] par contre fait intervenir des dislocations de Cottrell b = [100] qui glissent sous cette forme dans un plan $\{100\}_T$. Ceci pose un problème, car la dislocation de Cottrell n'a jamais été mise en évidence jusqu'à maintenant. Nous pouvons faire quelques remarques à ce sujet :

— Dans le modèle de l'initiation de la fissure de clivage proposé par Cottrell (v. chapitre I, paragraphe II.B) la dislocation b = [100] doit servir de barrière aux deux empilements de dislocations. Elle doit donc être extrêmement stable. Au contraire, dans le modèle de croisement de type [210] elle n'a besoin de rester stable que pendant la traversée de la macle obstacle. Elle n'a aucun rôle de barrière à jouer.

— La dislocation b = [100] n'intervient sous cette forme que dans le cas du croisement [210]. C'est également le seul cas où elle a un plan de glissement simple possible : $\{100\}_T$.

— L'augmentation d'énergie de ligne correspondant à la réaction de type 2 :

$$1/2\ [111]_M \rightarrow [001]_T + 1/6\ [111]_T$$

est de 45 %. C'est exactement la même que l'augmentation durant la réaction de type 1 :

$$1/2\ [111]_M \rightarrow 1/2\ [111]_T + 2/6\ [111]_T$$

Par contre, la réaction qui fait intervenir la forme décomposée de la dislocation de Cottrell [100] $\rightarrow$ 1/2 [111] + 1/2 [111] exige une augmentation d'énergie beaucoup plus grande (110 %).

— La dislocation incidente $1/2\ [111]_M$ s'écrit $1/6\ [115]_T$ dans la macle. 1/6 [115] est presque égal à [001]. Dans toutes les réactions du type 2, on observe la formation de cette dislocation, même si elle se dissocie ensuite. Elle décrit correctement le cisaillement. Elle permet d'estimer la contrainte qui apparaît au moment de l'incorporation.

— Comme nous l'avons souligné au chapitre précédent, seule la dislocation parallèle à l'axe d'intersection peut exister dans la macle obstacle. Ainsi la dislocation de Cottrell est parallèle à [210] dans le cas du croisement de type [210]. Elle a un plan de glissement facile. On peut imaginer qu'elle a alors tendance à se mettre selon une certaine direction du plan de glissement facile avant de se dissocier. Si c'est le cas, elle émergera de la macle obstacle sous la forme [100] avant d'avoir pris cette configuration favorable.

II. — APPLICATION A L'INITIATION DU CLIVAGE

Toutes les intersections font intervenir la dislocation de Cottrell b = [100] dite « dislocation de fissure ». Nous allons maintenant regarder de façon précise dans quelle mesure cette dislocation peut effectivement provoquer le clivage dans les différents cas d'intersection.

Les plans de clivage sont de type {100}. Le croisement doit remplir à priori deux conditions pour avoir une bonne chance de provoquer le clivage. Il faut que :

1) *la direction d'intersection soit dans un plan {100};*

2) *les contraintes qui apparaissent au cours de l'incorporation puissent provoquer l'ouverture du clivage. Il faut donc qu'elles aient une composante normale aux plans de clivage potentiels.*

---

* Voir annexe C.

Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus pour les différents types de croisement. Nous avons indiqué le plan de clivage possible et la nature de la barrière de Cottrell formée :

Type d'intersection	Plan de clivage possible	Barrière de Cottrell formée
$<3\bar{1}1>$		$<010>$
$<0\bar{2}1>$	(100)	$<010>$
$<1\bar{1}0>$	(001)	$<001>$

Il n'y a que deux types de croisement qui remplissent la première condition : [210] et [110]. Mais l'examen du tableau montre qu'ils sont différents. Dans le cas du croisement [210] la dislocation de Cottrell formée a son vecteur de Bürgers dans le plan de clivage possible. Elle n'introduit donc dans ce plan que des contraintes de cisaillement à l'exclusion de toute contrainte normale. Dans le cas du croisement [110] au contraire, le vecteur de Bürgers de la dislocation de Cottrell est normal au plan de clivage. Les contraintes normales induites par ces dislocations sont donc maximales précisément dans le plan de clivage possible. On sait d'ailleurs par expérience que ce type de croisement est lié à l'initiation du clivage.

Le modèle que nous venons de décrire entraîne donc la formation de la fissure de clivage dans la macle (c'est dans la macle qu'apparaît la dislocation [100]). Le passage de la fissure de clivage de la macle à la matrice ne pose pas beaucoup de problème : on passe du plan $(001)_T$ au plan $(001)_M$ par une déviation de 48° le long de l'axe $<1\bar{1}0>$ d'intersection des deux macles. Les contraintes normales dans le plan $(001)_M$ sont encore assez fortes pour que la fissure de clivage puisse se propager [73].

III. — APPLICATION : INTERACTION MACLE-JOINT DE GRAIN-PROPAGATION DU CLIVAGE

Tous ces résultats mettent en relief l'importance des conditions géométriques sur l'initiation du clivage. Pour provoquer la fissure il faut atteindre localement la contrainte théorique de clivage. Comme elle est extrêmement forte, ceci est difficile, car il existe beaucoup de processus susceptibles de la relâcher. Il est donc important de respecter une géométrie stricte pour que la contrainte atteigne la limite théorique précisément dans la bonne direction.

L'argument du critère géométrique peut sans doute être étendu : ainsi considérons le blocage d'une macle par un joint de grain. Le même raisonnement que ci-dessus nous indique que, pour qu'il y ait une chance d'initier le clivage, il faut que le joint de grain et le grain obstacle lui-même respectent simultanément des conditions d'orientation. Ces deux conditions sont rarement remplies et on sait bien que le blocage d'une macle par un joint de grain est un mécanisme peu efficace pour initier le clivage.

On retrouve les mêmes restrictions lors de la propagation d'une fissure. Il y a également des données géométriques à respecter pour que le clivage passe d'un grain à l'autre. On connaît la répartition de la contrainte en tête d'une fissure. Pour que l'obstacle du joint puisse être franchi il faut que cette contrainte puisse « ouvrir » un clivage dans le grain adjacent. On a montré expérimentalement que les joints de grains peuvent ralentir et même arrêter la propagation de la fissure [74].

IV. — CONCLUSIONS

Nous avons montré que le croisement des macles mécaniques engendre de fortes concentrations de contraintes. Mais les mécanismes de relaxation existent toujours. On peut les prévoir à l'aide de la théorie de Sleeswyk : les macles mécaniques sont décrites par la famille de dislocations émissaires qui donne le cisaillement équivalent et on étudie l'incorporation de ces dislocations émissaires dans la macle obstacle.

Les deux hypothèses que nous avons posées ont été confirmées par l'expérience :

— les plans de relaxation contiennent l'axe d'intersection des deux macles;

— le cisaillement est conservé (il n'y a pas d'accumulation de dislocations du même signe à l'endroit où se produit la réaction).

Ces deux règles permettent d'interpréter l'ensemble des réactions que nous avons observées. Il n'y a pas de problème pour que les

dislocations parfaites créées glissent. Par contre, l'incorporation d'un émissaire fait apparaître des dislocations partielles dont l'accumulation aboutit à la formation d'un joint de macle incohérent. Il y a alors deux cas :

1) La macle incidente bloque le glissement du joint incohérent.

Dans ce cas, les relaxations des parfaites sont confinées dans la macle obstacle. Il y a toujours deux types de réactions d'incorporation qui s'équilibrent de telle sorte que la somme des vecteurs de Bürgers des partielles créées soit nulle (on retrouve donc le schéma du joint de macle incohérent stable proposé par Sleeswyk).

2) La macle incidente ne bloque pas le glissement du joint incohérent.

Dans ce cas il apparaît toujours des relaxations dans la matrice. Il peut n'y avoir qu'un seul type de réaction d'incorporation.

Nous avons ainsi pu interpréter toutes les configurations observées. Des considérations géométriques simples nous ont, d'autre part, permis de comprendre pourquoi le croisement [110] est celui qui provoque le plus souvent la formation du clivage.

La méthode d'analyse proposée par Sleeswyk s'est avérée parfaitement adaptée à cette étude. Cependant il ne nous semble pas que cela donne une preuve de l'existence des dislocations émissaires meilleure que celles proposées précédemment. Nous avons toujours raisonné sur les cisaillements. Les dislocations émissaires fournissent un formalisme commode pour analyser et décrire ce cisaillement. C'est sans doute là la raison profonde de la bonne adaptation de cette théorie au problème traité. Mais tout autre formalisme qui permettrait une analyse aussi souple du cisaillement s'adapterait sans doute aussi bien.

Cette étude nous permet de décrire et d'interpréter les phénomènes de relaxation qui se produisent au croisement des macles. Elles ne permet pas de les prévoir. En d'autres termes nous avons fait ici une étude géométrique et statique. Il n'est pas évident que nous ayons été exhaustifs : d'autres systèmes de relaxations que ceux que nous avons décrits pourraient intervenir. Notre étude indique cependant que ces systèmes pourraient être analysés et interprétés à l'aide de la géométrie que nous avons présentée.

Il conviendrait maintenant de faire l'étude dynamique qui, tenant compte des contraintes appliquées, permettrait de prévoir les modes de relaxations actifs. Pour cela il faudra avoir des données sur le mode de germination, de croissance et de propagation des macles mécaniques, car, beaucoup plus que la contrainte macroscopique appliquée, c'est la contrainte locale en tête de la macle en progression, puis bloquée sur l'obstacle qui intervient pour dicter le choix du mode de relaxation.

ANNEXE A

Cristallographie du maclage

Le maclage correspond au cisaillement homogène d'une portion de cristal située entre deux plans parallèles. Cette déformation doit conserver la symétrie du cristal et le volume de la maille. Pour cela il faut qu'il y ait deux plans invariants dans la transformation. Dans ces deux plans invariants on prendra trois directions cristallographiques non coplanaires qui définiront la maille.

Les éléments de maclage ont été introduits par Cahn [14]. Rappelons-en la définition (fig. A.1.) :

La portion de cristal située au-dessus de K_1 (plan de maclage) subit un cisaillement homogène dans la direction η_1 (direction de cisaillement). Le plan normal à K_1 et contenant η_1 est le plan de cisaillement.

La sphère de rayon unité se transforme en ellipsoïde au cours du cisaillement homogène. L'intersection de la sphère et de l'ellipsoïde est une courbe du quatrième degré. Elle comprend déjà le cercle situé dans le plan K_1 qui est invariant dans la transformation. L'intersection est donc dégénérée. L'autre partie est

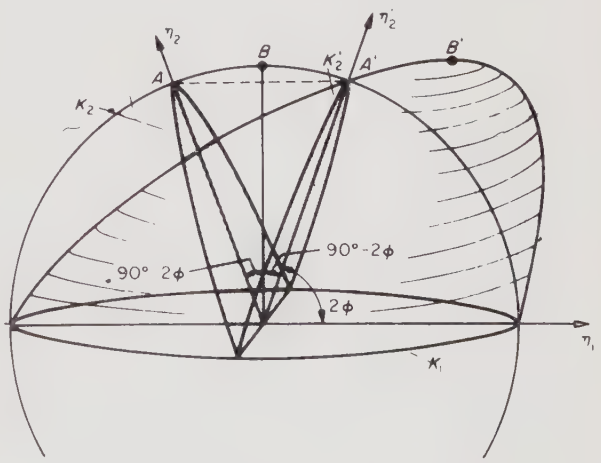


FIG. A.1.
Définition des éléments cristallographiques du maclage.

une conique. Elle est donc située dans un plan et comme elle est également sur la sphère, c'est un cercle. Ce cercle est situé dans le plan K'_2 qui est le transformé de K_2 dans le cisaillement. Le couple K_2 — K'_2 définit le deuxième plan invariant de la transformation.

Le plan de cisaillement coupe les plans K_2 et K'_2 selon les directions η_2 et η'_2 respectivement. Le cisaillement s est représenté par le déplacement subi par un point situé à une distance unité. On le relie à l'angle 2φ fait entre les plans K_1 et K_2 par la formule

$$s = 2 \cot 2\varphi$$

Les directions cristallographiques invariantes qui définissent la maille sont nécessairement dans les plans K_1 et K_2. Selon les cas on définit différentes sortes de macle :

1) Macle de première espèce : K_1 et η_2 sont rationnels. La macle se déduit alors du cristal soit par une symétrie dans K_1, soit par une rotation de 180° autour de la normale à K_1.

2) Macle de seconde espèce : K_2 et η_1 sont rationnels. La macle se déduit alors du cristal soit par une rotation de 180° autour de η_1, soit par une symétrie dans le plan normal à η_1.

Dans le cas particulier des macles mécaniques des matériaux de structure cubique centrée K_1, K_2, η_1 et η_2 sont tous rationnels. La macle est dite composée. Toutes les symétries qui viennent d'être définies ci-dessus permettent d'engendrer la macle. Enfin, K_1 et K_2, d'une part, η_1 et η_2, d'autre part, sont de même nature : les couples K_1, η_1 et K_2, η_2 définissent donc tous deux une macle. Ces deux macles sont dites réciproques, conjuguées ou complémentaires.

K_1 et η_1 sont respectivement de la forme {112} et [111]. D'après la définition η_1 est parallèle à K_1. On en déduit que, dans le cas de la structure cubique, il y a une direction η_1 pour un plan K_1 (une direction [111] dans un plan {112}). Mais trois plans K_1 pour une même direction η_1 (trois plans {112} qui contiennent une même direction [111]).

Considérons maintenant la macle $(11\bar{2})$ $<111>$. On passe de la matrice à la macle par une symétrie dans le plan $(11\bar{2})$. Mais la direction $<111>$ qui est une direction de la matrice et de la macle est un axe de symétrie ternaire pour la macle et pour la matrice. On passe du plan $(11\bar{2})$ au plan $(1\bar{2}1)$ par une rotation de 120° autour de $<111>$. Cette rotation conserve le cristal de la matrice et de la macle qui sont donc symétriques l'un de l'autre également dans le plan $(1\bar{2}1)$. Comme cette symétrie est celle qui engendre la macle $(1\bar{2}1)$ on en déduit que les macles $(1\bar{2}1)$ et $(11\bar{2})$ ont des orientations cristallographiques identiques. Cette propriété s'étend à toutes les macles possibles ayant une même direction de cisaillement [111]. On en déduit la règle.

Les trois macles correspondant aux trois plans {112} ayant une même direction [111] ont une orientation cristallographique identique. Elles ne se distinguent que par leurs traces. En particulier, elles ont en commun avec la matrice toute la zone {111} correspondant à l'axe [111] commun.

Une manière d'engendrer les macles (donc de provoquer un cisaillement homogène) dans les matériaux de structure cubique centrée est de faire passer sur chaque plan de maclage {112} de la portion du cristal à macler une dislocation partielle 1/6 [111] (dite dislocation de macle; voir figure A.2). Cette description est exacte dans la structure cubique centrée. Elle n'est qu'approchée dans le cas de la structure hexagonale où il faut, après passage des dislocations, rajuster légèrement les positions des atomes. C'est le « shuffling ».

Cette méthode de génération de la macle montre bien que le maclage correspond à un cisaillement orienté : sur la figure A.2 on voit que c'est la dislocation $1/6 <\bar{1}\bar{1}1>$ qui engendre le maclage. La dislocation $1/6 <11\bar{1}>$ ne l'engendre pas.

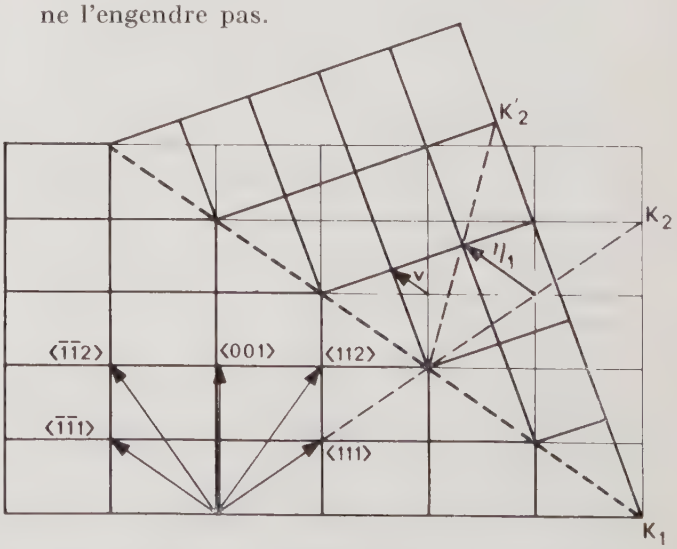


Fig. A.2.

On engendre la macle (112) en faisant passer sur chaque plan (112) une dislocation $v = 1/6 <\bar{1}\bar{1}1>$. Le cisaillement correspondant est orienté.

ANNEXE B

Les différents types d'intersection

Nous repérerons les différents types d'intersections par les incides cristallographiques de l'axe commun aux deux plans de macles considérés.

La figure B.1 représente la position des quatre vecteurs [111] par rapport au plan de macle (112). Chacune de ces directions [111] est commune à trois plans {112} qui se déduisent les uns des autres par une rotation de 60° autour de la direction [111] commune.

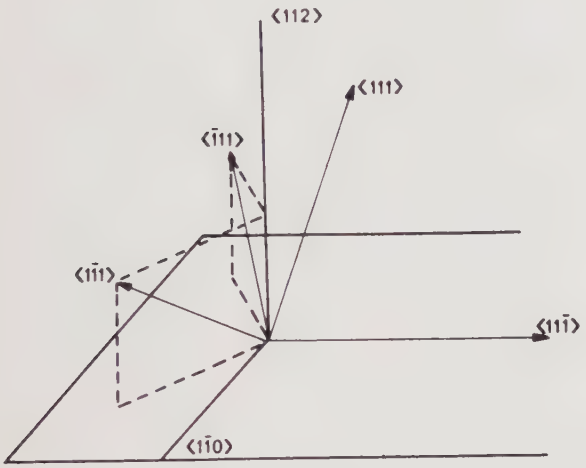


FIG. B.1.

Position des vecteurs [111] par rapport au plan de macle (112). On voit que $<1\bar{1}1>$, $<\bar{1}11>$ et $<\bar{1}\bar{1}\bar{1}>$ se déduisent les uns des autres par une rotation de 120° autour de l'axe $<11\bar{1}>$.

Nous allons examiner les intersections de différentes macles avec la macle (112) en regroupant les macles par famille. La famille est définie comme l'ensemble des trois macles ayant une direction [111] commune.

Le plan $(1\bar{1}0)$ est un plan de symétrie du cristal et de la macle (112) : les directions $<1\bar{1}1>$ et $<\bar{1}11>$ sont symétriques dans ce plan. Les familles correspondantes sont équivalentes. Nous les regrouperons dans une même famille.

1) Famille A : direction commune $<11\bar{1}>$.

L'axe $<11\bar{1}>$ est dans le plan (112). C'est donc l'axe d'intersection avec les macles de cette famille. C'est le cas d'intersection qui correspond aux hypothèses de Cahn : la direction $<11\bar{1}>$ de cisaillement de la macle incidente est parallèle au plan (112) de la macle obstacle.

2) Familles B : directions communes $<\bar{1}11>$ et $<1\bar{1}1>$.

Elles donnent lieu chacune à trois types d'intersections : [210], [311], $[531]_a$.

3) Famille C : direction commune <111>.

Elle donne lieu à deux intersections différentes : une selon [110] et deux selon $[531]_b$. Ces dernières sont différentes des intersections $[531]_a$ des familles B. Nous verrons en effet dans l'Annexe C que, si les axes d'intersection sont équivalents, les réactions d'incorporation des dislocations émissaires des macles qui donnent lieu aux intersections de type $[531]_a$ et $[531]_b$ sont différentes.

Il faut maintenant justifier que les deux intersections $[531]_b$ sont équivalentes. On peut voir facilement que les deux macles qui leur donnent naissance sont symétriques par rapport au plan $(1\bar{1}0)$ (elles se déduisent du plan $(11\bar{2})$ par une rotation de $\pm$ 60° autour de <111>). Tous ces éléments respectent la symétrie autour de $(1\bar{1}0)$. Elles sont donc bien identiques.

En résumé, il y a douze plans de macles possibles. Un plan {112} est coupé par les onze autres plans possibles selon onze directions qu'on peut regrouper en six groupes définis par les indices de l'axe d'intersection. Dans ces onze intersections, il y en a deux qui se font selon un axe du type [111], deux selon [210], deux selon [311], deux selon $[531]_a$, deux selon $[531]_b$ et une seule selon [110]. Cette dernière intersection correspond à la macle conjuguée dans les notations de Cahn. Nous avons regroupé dans le tableau B l'ensemble des intersections de l'ensemble des macles possibles.

Le classement par famille que nous venons de présenter se fait d'après les vecteurs de Bürgers des dislocations émissaires des différentes macles et par rapport à une macle obstacle donnée. Nous pouvons donner une règle simple. Par rapport à une macle obstacle deux macles quelconques se classeront dans la même famille si les projections du vecteur de Bürgers de leurs dislocations émissaires sur la normale au plan de la macle obstacle sont égales.

TABLEAU B

Intersections des plans {112}

	$(11\bar{2})$	$(1\bar{2}1)$	$(\bar{2}11)$	$(\bar{1}12)$	$(\bar{1}21)$	$(\bar{2}\bar{1}1)$	$(1\bar{1}\bar{2})$	$(12\bar{1})$	$(2\bar{1}\bar{1})$	$(1\bar{1}2)$	$(\bar{1}2\bar{1})$	$(\bar{2}1\bar{1})$
(112)		$\bar{3}11$	$1\bar{3}1$	$02\bar{1}$	$\bar{1}\bar{1}\,1$	$\bar{1}\,\bar{5}\,3$	$20\bar{1}$	513	$11\bar{1}$	$1\,\bar{1}\,0$	$\bar{5}31$	$\bar{3}5\bar{1}$
(121)	$\bar{3}11$		$11\bar{3}$	$1\bar{1}1$	$0\bar{1}2$	$1\bar{3}5$	$\bar{5}13$	$10\bar{1}$	$31\bar{5}$	$5\bar{3}1$	$\bar{2}10$	$1\bar{1}1$
(211)	$\bar{1}31$	$11\bar{3}$		$\bar{1}53$	$13\bar{5}$	$0\bar{1}1$	$\bar{1}11$	$\bar{3}15$	$10\bar{2}$	$\bar{3}51$	$\bar{1}11$	$\bar{1}20$
$\bar{1}12$	$\bar{0}21$	$\bar{1}11$	$\bar{1}53$		311	$13\bar{1}$	110	$53\bar{1}$	$35\bar{1}$	201	$\bar{5}13$	$1\bar{1}1$
$\bar{1}21$	$\bar{1}11$	$\bar{0}12$	$13\bar{5}$	311		$1\bar{1}3$	$53\bar{1}$	210	$11\bar{1}$	513	101	$\bar{3}15$
$\bar{2}11$	$\bar{1}53$	$\bar{1}35$	$\bar{0}11$	$13\bar{1}$	$1\bar{1}3$		351	111	120	111	315	102
$\bar{1}12$	$20\bar{1}$	$\bar{5}13$	$\bar{1}11$	110	$53\bar{1}$	351		$31\bar{1}$	$\bar{1}31$	021	$\bar{1}11$	$\bar{1}53$
$\bar{1}21$	513	101	$\bar{3}15$	531	210	111	$31\bar{1}$		$\bar{1}13$	111	012	135
$\bar{2}11$	$11\bar{1}$	$31\bar{5}$	$10\bar{2}$	$35\bar{1}$	$11\bar{1}$	120	$\bar{1}31$	$\bar{1}13$		153	$\bar{1}35$	011
$\bar{1}12$	$1\,\bar{1}\,0$	$5\bar{3}1$	$\bar{3}51$	201	513	111	021	111	153		$\bar{3}11$	$\bar{1}31$
$\bar{1}21$	531	210	111	$\bar{5}13$	101	$\bar{3}15$	$\bar{1}11$	012	$\bar{1}35$	$\bar{3}11$		113
$\bar{2}11$	351	111	120	$\bar{1}11$	$\bar{3}15$	102	$\bar{1}53$	135	011	$\bar{1}31$	113	

Annexe C

Les différents types d'incorporation

I. — Analytiquement

Nous allons d'abord établir la matrice de transformation qui permet de passer des axes de la matrice à ceux de la macle (repérés respectivement par les indices M et T). Nous appliquerons cette matrice de transformation aux différents vecteurs de Bürgers possibles et nous étudierons les différentes formes de décomposition.

A. — Matrice de transformation

Nous avons vu que les macles mécaniques des matériaux de structure cubique centrée sont composées. Nous pouvons donc utiliser tous les éléments de symétrie décrits en Annexe A pour les engendrer.

Pour la matrice de transformation nous allons utiliser la définition de la macle de première espèce : rotation de 180° autour de la normale $N(p, q, r)$ au plan de macle.

Nous allons écrire que le vecteur $\vec{V}(h, k, l)$ se transforme en un vecteur $\vec{U}(u, v, w)$. Ceci se traduit par la relation :

$$\vec{V} + \vec{U} = 2 \frac{\vec{V} \cdot \vec{N}}{N^2} \cdot \vec{N} \qquad (1)$$

ou :

$$U = 2 \frac{\vec{V} \cdot \vec{N}}{N^2} \vec{N} - \vec{V} \qquad (2)$$

d'où, en développant sur les coordonnées

$$(u, v, w) = \frac{hp + kq + rl}{p^2 + q^2 + r^2} (p, q, r) - (h, k, l) \qquad (3)$$

On en déduit la matrice de transformation :

$$(u, v, w) = \begin{vmatrix} \frac{2p^2}{N^2} - 1 & \frac{2pq}{N^2} & \frac{2pr}{N^2} \\ \frac{2pq}{N^2} & \frac{2q^2}{N^2} - 1 & \frac{2qr}{N^2} \\ \frac{2pr}{N^2} & \frac{2qr}{N^2} & \frac{2r^2}{N^2} - 1 \end{vmatrix} \begin{matrix} h \\ k \\ l \end{matrix} \qquad (4)$$

avec $N^2 = p^2 + q^2 + r^2$.

Tableau C.1

	112		121		211
1/3	−2 1 2 1 −2 2 2 2 1	1/3	−2 2 1 2 1 2 1 2 −2	1/3	1 2 2 2 −2 1 2 1 −2
	$\bar{1}12$		$\bar{1}21$		$\bar{2}11$
1/3	−2 −1 −2 −1 −2 2 −2 2 1	1/3	−2 −2 −1 −2 1 2 −1 2 −2	1/3	1 −2 −2 −2 −2 1 −2 1 −2
	$1\bar{1}2$		$1\bar{2}1$		$2\bar{1}1$
1/3	−2 −1 2 −1 −2 −2 2 −2 1	1/3	−2 −2 1 −2 1 −2 1 −2 −2	1/3	1 −2 2 −2 −2 −1 2 −1 −2
	$\bar{1}\bar{1}2$		$\bar{1}\bar{2}1$		$\bar{2}\bar{1}1$
1/3	−2 1 −2 1 −2 −2 −2 −2 1	1/3	−2 2 −1 2 1 −2 −1 −2 −2	1/3	1 2 −2 2 −2 −1 −2 −1 −2

Le tableau C.1 donne les douze matrices de transformation correspondant aux douze possibilités pour les indices 1, 1, 2,

B. — Propriétés de la transformation

L'axe de rotation est la seule direction propre réelle de la transformation. La normale à la macle sera donc la seule direction qui conservera ses indices. Par contre, le plan de macle est globalement invariant et la rotation revient à inverser le sens de toutes les directions. Les directions du plan de macle vont donc changer de signe au cours de la transformation.

C. — Incorporation des dislocations parfaites dans la macle (112)

Nous allons profiter des symétries du cristal et donc ne traiter qu'une incorporation pour chaque famille équivalente.

1) Famille A : $1/2\ \langle 11\bar{1}\rangle$.

$$1/2\ \langle 11\bar{1}\rangle_M \rightarrow 1/2\ \langle \bar{1}\bar{1}1\rangle_T \text{ *} \qquad (5)$$

Nous retrouvons le changement de signe annoncé pour tout vecteur du plan (112). C'est le cas de croisement qui répond aux hypothèses de Cahn.

2) Famille B : $1/2\ \langle \bar{1}11\rangle$, $1/2\ \langle 1\bar{1}1\rangle$.

$$1/2\ \langle \bar{1}11\rangle_M \rightarrow 1/6\ \langle 5\bar{1}1\rangle_T \qquad (6)$$

Il y a deux types de décompositions possibles (tous deux prévus par Sleeswyk) :

— La décomposition de type 1 correspond à la réaction

$$1/6\ \langle 5\bar{1}1\rangle_T \rightarrow 2 \times 1/6\ \langle 11\bar{1}\rangle_T + 1/2\ \langle 1\bar{1}1\rangle_T \qquad (7)$$

Elle donne deux partielles de la macle obstacle et la dislocation parfaite de la famille B qui a les indices différents de l'incidente considérée.

— La décomposition de type 2 correspond à la réaction

$$1/6\ \langle 5\bar{1}1\rangle_T \rightarrow \langle 100\rangle_T + 1/6\ \langle \bar{1}\bar{1}1\rangle_T \qquad (8)$$

Elle donne une partielle de la macle obstacle (mais la même faute, car elle diffère d'une parfaite des deux partielles créées par la réaction précédente) et une dislocation $\langle 100\rangle_T$. Cette dernière peut éventuellement se redécomposer en deux dislocations 1/2 [111] qu'en peut ensuite faire glisser soit dans la matrice, soit dans la macle.

a) Décomposition et glissement dans la macle (type 2 *a*).

$$1/2\ \langle \bar{1}11\rangle_M \rightarrow 1/6\ \langle 5\bar{1}1\rangle_T \rightarrow 1/6\ \langle \bar{1}\bar{1}1\rangle_T + 1/2\ \langle 111\rangle_T + 1/2\ \langle 1\bar{1}\bar{1}\rangle_T \qquad (9)$$

Notons que $1/2\ \langle 1\bar{1}\bar{1}\rangle_T$ correspond à la dislocation émissaire de la macle secondaire (image de la macle incidente dans la macle obstacle). Elle a le signe convenable (c'est-à-dire opposé à celui de l'incidente) pour que le cisaillement produit soit effectivement le cisaillement « image ».

b) Décomposition et glissement dans la macle et la matrice (type 2 *b*).

$$1/2\ \langle \bar{1}11\rangle_M \rightarrow 1/6\ \langle \bar{1}\bar{1}1\rangle_T + 1/2\ \langle 1\bar{1}\bar{1}\rangle_T + 1/2\ \langle 111\rangle_M + 2/6\ \langle \bar{1}\bar{1}1\rangle_M$$

ou, en regroupant les partielles formées et en tenant compte du changement de signe introduit par la transformation :

$$1/2\ \langle \bar{1}11\rangle_M \rightarrow 1/6\ \langle \bar{1}\bar{1}1\rangle_M + 1/2\ \langle 1\bar{1}\bar{1}\rangle_T + 1/2\ \langle 111\rangle_M \qquad (10)$$

on peut encore incorporer l'autre dislocation de décomposition dans la matrice. Il vient :

$$1/2\ \langle \bar{1}11\rangle_M \rightarrow 1/6\ \langle \bar{1}\bar{1}1\rangle_M + 1/2\ \langle 111\rangle_T + 1/2\ \langle \bar{1}1\bar{1}\rangle_M \qquad (11)$$

3) Famille C : $1/2\ \langle 111\rangle$.

$$1/2\ \langle 111\rangle_M \rightarrow 1/6\ \langle 115\rangle_T \qquad (12)$$

a) Décomposition de type 1.

$$1/6\ \langle 115\rangle_T \rightarrow 2 \times 1/6\ \langle \bar{1}\bar{1}1\rangle_T + 1/2\ \langle 111\rangle_T \qquad (13)$$

---

* Les indices M et T signifient respectivement que le vecteur est repéré dans les axes de référence de la matrice (indice M) ou de la macle obstacle (indice T).

Notons que la dislocation $1/2\ <111>_T$ ne peut pas engendrer la macle secondaire car elle n'a pas le signe correct.

Pour cette famille, la réaction de type 1 engendre la dislocation opposée à celle de la macle secondaire dans la macle et deux partielles.

évidemment de la famille B. Il y a de plus une partielle de la macle obstacle.

Nous allons résumer l'ensemble des réactions d'incorporation des différentes dislocations émissaires dans la macle obstacle (112). Les résultats se trouvent dans le tableau C.2 ci-dessous.

Tableau C.2

Famille	Réaction d'incorporation de la dislocation émissaire incidente	Décomposition de tye 1	Décomposition de type 2
A	$1/2\ <11\bar{1}>_M \rightarrow$ $1/2\ <\bar{1}\bar{1}1>_T$		
B	$1/2\ <1\bar{1}1>_M \rightarrow$ $1/6\ <5\bar{1}1>_T$	$2 \times 1/6\ <11\bar{1}>_T +$ $1/2\ <1\bar{1}1>_T$	$1/6\ <\bar{1}\bar{1}1>_T +$ $<100>_T$
	$1/2\ <1\bar{1}1>_M \rightarrow$ $1/6\ <\bar{1}51>_T$	$2 \times 1/6\ <11\bar{1}>_T +$ $1/2\ <\bar{1}1\bar{1}>_T$	$1/6\ <\bar{1}\bar{1}1>_T +$ $<010>_T$
C	$1/2\ <111>_M \rightarrow$ $1/6\ <115>_T$	$2 \times 1/6\ <\bar{1}\bar{1}1>_T +$ $1/2\ <111>_T$	$1/6\ <11\bar{1}>_T +$ $<001>_T$

b) Décomposition de type 2.

$$1/6\ <115>_T \rightarrow 1/6\ <11\bar{1}>_T + <001>_T \quad (14)$$

$<001>_T$ peut se décomposer :

Si on conserve le glissement dans la macle (réaction de type 2 *a*) :

$$1/2\ <111>_M \rightarrow 1/6\ <11\bar{1}>_T + 1/2\ <\bar{1}11>_T + <1\bar{1}1>_T \quad (15)$$

On forme les deux dislocations de la famille B et une partielle.

Si on incorpore l'une des parfaites dans la matrice on obtient la réaction de type 2 *b* :

$$1/2\ <111>_M \rightarrow 1/6\ <11\bar{1}>_M + 1/2\ <1\bar{1}1>_T + 1/2\ <1\bar{1}1>_M \quad (16)$$

On obtient dans la matrice la même dislocation que dans la macle. Cette dislocation est

II. — Géométriquement

Tous ces résultats peuvent être retrouvés géométriquement. L'incorporation de la dislocation $1/2\ <11\bar{1}>$ ne pose aucun problème puisque $1/2\ <11\bar{1}>$ est un vecteur de Bürgers possible de la macle et de la matrice.

Pour traiter l'incorporation des dislocations des autres familles, nous allons établir les propriétés suivantes :

Un vecteur [111] se projette orthogonalement sur un autre vecteur [111] au tiers de la longueur de ce dernier.

En effet, la somme des quatre vecteurs [111] est soit nulle, soit égale à deux fois la longueur de l'un d'entre eux. Comme les trois vecteurs [111] se déduisent les uns des autres par une rotation de 120° autour du quatrième, les projections des trois vecteurs sur le quatrième sont égales. On en déduit la propriété.

Le problème de la décomposition de la parfaite incidente dans la macle obstacle se ramène au problème suivant. Etant donné un vecteur [111] de la matrice, comment peut-on le décomposer en une somme de vecteurs [111] de la macle ?

Nous avons déjà traité le problème de l'incorporation de la dislocation $1/2\ \langle 11\bar{1}\rangle$ dans la macle (112). Les trois autres vecteurs de Bürgers possibles $1/2\ \langle \bar{1}11\rangle$, $1/2\ \langle 1\bar{1}1\rangle$ et $1/2\ \langle \bar{1}\bar{1}\bar{1}\rangle$ se déduisent les uns des autres par une rotation de 120° autour de $\langle 11\bar{1}\rangle$. Comme nous avons montré que ces rotations conservent l'orientation de la matrice et de la macle, les conditions géométriques de décomposition pour les trois vecteurs sont exactement identiques. Elles se déduisent les unes des autres par les rotations de 120° autour de $\langle 11\bar{1}\rangle$. Les configurations de réaction seront donc superposables par cette rotation. Ce qui change, c'est seulement la position relative des vecteurs [111] qui composent la réaction par rapport à la macle obstacle (112). Nous retrouvons ici l'idée présentée en Annexe B que le classement des macles se fait en fonction des directions de cisaillement par rapport à une macle obstacle donnée.

Les trois macles (112), $(\bar{1}21)$ et $(2\bar{1}1)$ ont une orientation cristallographique équivalente puisqu'elles ont la même direction de cisaillement $\langle 11\bar{1}\rangle$. La dislocation $1/2\ \langle 111\rangle$ correspond à la famille C pour la macle (112), mais à la famille B pour les macles $(\bar{1}21)$ et $(2\bar{1}1)$. La forme analytique de la réaction dépendra donc de la nature de la macle obstacle mais ces formes analytiques différentes représentent une forme géométrique identique (qui ne dépend évidemment que du vecteur et de l'orientation du cristal maclé qui est la même quelle que soit la macle de la zone $\langle 11\bar{1}\rangle$.

Nous allons traiter l'incorporation de la dislocation $1/2\ \langle 111\rangle$ (famille C) dans la macle (112). La figure représentative est alors plane. Nous verrons comment transposer les résultats à la famille B.

A. — Famille C — 1/2 < 111 >

La figure C.1 représente le plan $(1\bar{1}0)_M$ avec la macle (112). Les deux réactions de types 1 et 2 apparaissent immédiatement sur la figure (on se rappelle que le passage de la matrice à la macle se fait par une rotation de 180° autour de l'axe $\langle 112\rangle$). Nous pouvons donc écrire les réactions qui apparaissent :

type 1 :

$$1/2\ \langle 111\rangle_M \rightarrow 1/2\ \langle 111\rangle_T + 2 \times 1/6\ \langle \bar{1}\bar{1}1\rangle_T \qquad (17)$$

type 2 :

$$1/2\ \langle 111\rangle_M \rightarrow \langle 001\rangle_T + 1/6\ \langle 11\bar{1}\rangle_T \qquad (18)$$

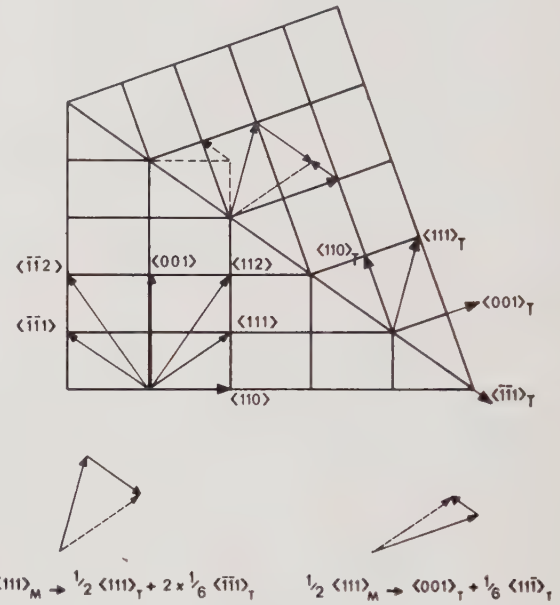


Fig. C.1
Réaction de type 1
Réaction de type 2

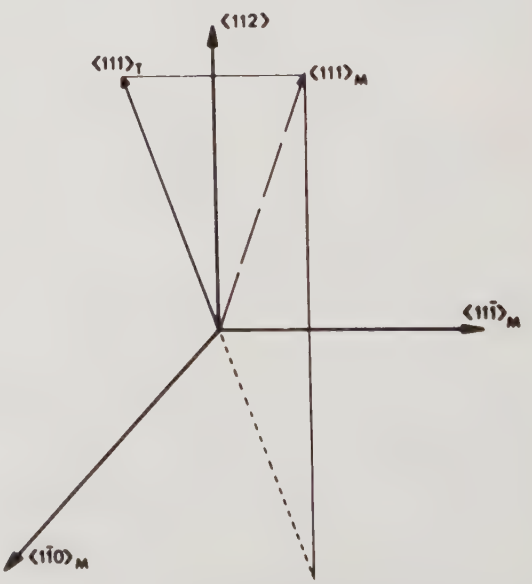


Fig. C.2.

La figure C.2 reprend le schéma de la réaction de type 1 mais les réseaux de la macle et de la matrice n'y sont pas dessinés.

B. — Famille B — 1/2 $<\bar{1}11>$ et 1/2 $<1\bar{1}\bar{1}>$

Considérons, par exemple, l'incorporation de la dislocation 1/2 $<\bar{1}11>_M$. Les directions $<\bar{1}11>_M$ et $<11\bar{1}>_M$ définissent le plan $(101)_M$ qui se déduit du plan $(1\bar{1}0)_M$ (plan de la figure C.1) par une rotation de 120° autour de $<111>$.

Dans le plan $(101)_M$ le schéma de l'incorporation de 1/2 $<\bar{1}11>_M$ est identique au schéma dans le plan $(1\bar{1}0)_M$ de l'incorporation de 1/2 $<\bar{1}11>_M$. Donc le plan $<\bar{1}11>_M$, $<11\bar{1}>_M$ de la figure C.3 se déduit du plan $<111>_M$, $<11\bar{1}>_M$ de la figure C.2 par une rotation de 120° (pour la commodité du dessin nous avons représenté $<111>_M$ alors que c'est $<\bar{1}\bar{1}\bar{1}>_M$ qui peut engendrer $<\bar{1}11>_M$ et $<1\bar{1}1>_M$ par rotation autour de $<11\bar{1}>_M$). Dans cette rotation $<111>_T$ (ou plutôt $<\bar{1}\bar{1}\bar{1}>_T$) se transforme en un vecteur de la macle V et on peut écrire :

$$1/2\ <\bar{1}11>_M \rightarrow \vec{V} + 2 \times 1/6\ <11\bar{1}>_T$$

La figure C.3 montre clairement que le vecteur $\vec{V}$ est 1/2 $<1\bar{1}1>_T$ (il se déduit de $<1\bar{1}\bar{1}>_M$ par une rotation de 180° autour de $<112>$).

D'où la réaction :

$$1/2\ <\bar{1}11>_M \rightarrow 1/2\ <1\bar{1}1>_T + 2 \times 1/6\ <11\bar{1}>_T \qquad (19)$$

Nous avons vu que l'équation (19) s'écrit dans le plan $(101)_M$. Ce plan, qui contient également $<1\bar{1}1>_T$ et $<11\bar{1}>_T$, est également le plan $(011)_T$. La réaction de type 2 fait donc intervenir $<100>_T$ seule direction [100] du plan. Nous pouvons écrire par analogie avec (18) et (19) :

$$1/2\ <\bar{1}11>_M \rightarrow <100>_T + 1/6\ <\bar{1}\bar{1}1>_T \qquad (20)$$

Mais on peut également obtenir cette équation en remarquant que la somme des quatre vecteurs [111] est nulle et donc que :

$$1/2\ <1\bar{1}1>_T \rightarrow 1/2\ <111>_T + 1/2\ <\bar{1}11>_T + 1/2\ <1\bar{1}\bar{1}>_T \qquad (21)$$

En reportant alors (21) dans (19), il vient :

$$1/2\ <\bar{1}11>_T \rightarrow 1/6\ <\bar{1}1\bar{1}>_T + 1/2\ <1\bar{1}1>_T + 1/2\ <1\bar{1}\bar{1}>_T \qquad (22)$$

qui est une forme développée de (20).

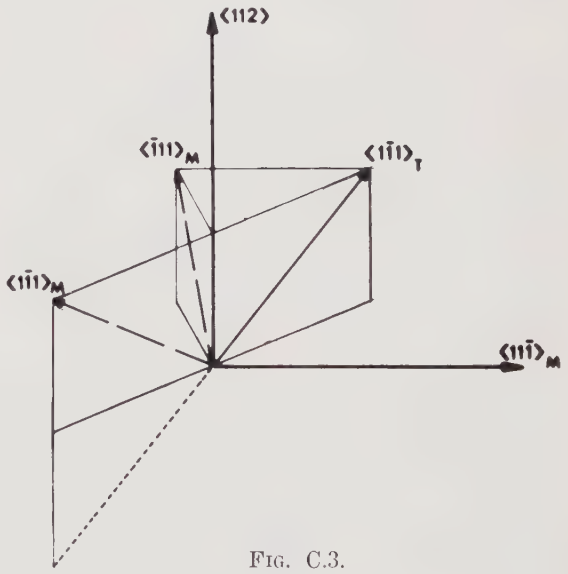


Fig. C.3.

Nous savons maintenant écrire les réactions de types 1 et 2. Les réactions de types 2 *a* ou 2 *b* se déduisent de la réaction de type 2 par décomposition de la dislocation [100] et par incorporation de type 1 de l'une des parfaites obtenues. Nous pouvons donc écrire toutes les équations de type 2 *b* qui ne sont que des combinaisons d'incorporation de type 1.

ANNEXE D

Nature des dislocations partielles laissées à l'incorporation

Toute dislocation qui n'est pas parallèle au plan de macle cohérent crée une marche lors de son incorporation. Le décalage introduit est d'un plan (112) pour les dislocations parfaites de la famille B, de deux plans (112) pour celles de la famille C (voir fig. B.1). Il apparaît donc des partielles qui doivent border les fautes que représentent les marches. La conservation du vecteur de Bürgers exige que la somme des vecteurs de Bürgers créés dans la macle (y compris ceux des partielles laissées sur le plan d'incorporation) soit égale au vecteur de Bürgers de la dislocation incidente. Nous allons montrer que toutes les équations écrites laissent la bonne faute lors de l'incorporation. Pour cela nous avons besoin de connaître la nature des fautes. Il faut donc raisonner sur les cisaillements.

I. — CISAILLEMENT PRODUIT PAR LES MACLES

La figure A.2 montre qu'on passe de la matrice à la macle (112) par un cisaillement homogène dans la direction $<\bar{1}\bar{1}1>$ de la portion de cristal située du côté de la normale positive $<112>$.

On peut alors, par permutation circulaire, déduire le sens de cisaillement correspondant à chacune des macles (une règle pratique est la suivante : on prend les deux directions [111] qui se trouvent dans le même plan que la direction [112] considérée, par exemple $<11\bar{2}>$, $<11\bar{1}>$ et $<111>$. On prend la direction qui fait un angle aigu avec $<11\bar{2}>$: ici $<11\bar{1}>$. La direction de cisaillement de la portion du cristal située du côté de la normale positive $<11\bar{2}>$ par rapport au plan $(11\bar{2})$ est celle qui fait un angle obtu avec $<11\bar{1}>$ soit $<\bar{1}\bar{1}\bar{1}>$).

Le tableau D donne le sens de cisaillement pour l'ensemble des macles.

En prenant comme convention de signe du vecteur de Bürgers la convention FS/RH, on sait que : lorsque la dislocation glisse dans une direction $\vec{x}$ la ligne de dislocation étant orientée par sa tangente $\vec{t}$, la partie du cristal située du côté positif du vecteur $\vec{t} \wedge \vec{x}$ par rapport au plan de glissement est cisaillée de $\vec{b}$ par rapport à l'autre région [75].

Tableau D

Plan de macle (normale positive)	Direction du cisaillement du cristal (situé du côté de la normale positive)
112	$\bar{1}\bar{1}1$
121	$\bar{1}1\bar{1}$
211	$1\bar{1}\bar{1}$
$\bar{1}12$	$\bar{1}\bar{1}1$
$\bar{1}21$	$\bar{1}1\bar{1}$
$21\bar{1}$	$1\bar{1}\bar{1}$
$1\bar{1}2$	$\bar{1}\bar{1}1$
$1\bar{2}1$	$\bar{1}1\bar{1}$
$2\bar{1}1$	$1\bar{1}\bar{1}$
$11\bar{2}$	$\bar{1}\bar{1}\bar{1}$
$12\bar{1}$	$\bar{1}\bar{1}1$
$21\bar{1}$	$\bar{1}\bar{1}1$

La figure D.1 donne le sens de cisaillement des deux macles sécantes pour les trois types de croisement [210], [311] et [110].

Nous allons vérifier sur deux exemples la propriété annoncée : l'un pris dans la famille B, l'autre dans la famille C.

II. — INTERSECTION AVEC UN VECTEUR DE LA FAMILLE B

Nous avons pris l'exemple de l'intersection $<3\bar{1}\bar{1}>$: la macle incidente (121) vient rencontrer la macle obstacle (112).

Pour faciliter la représentation, nous allons supposer que toutes les dislocations introduites sont parallèles à la direction $<3\bar{1}\bar{1}>$ et orientées par la direction positive de ce vecteur. La convention FS/RH implique alors que la dislocation émissaire de la macle (121) dans la géométrie de croisement donnée par la figure D.1, soit $1/2\ <\bar{1}1\bar{1}>$.

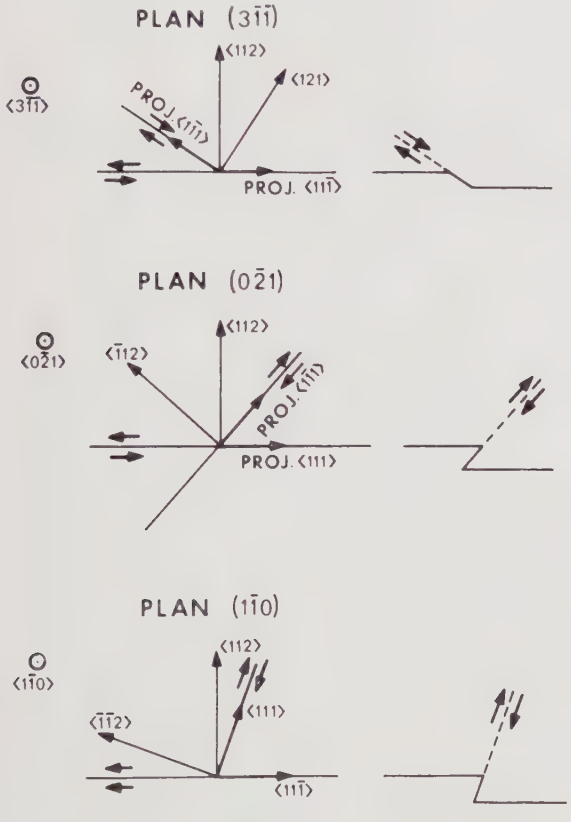


FIG. D.1.

Nature des fautes qui forment le joint incohérent.

Ecrivons la réaction d'incorporation :

$$1/2\ <\bar{1}1\bar{1}>_M \rightarrow 1/2\ <1\bar{1}\bar{1}>_T + 2/6\ <\bar{1}\bar{1}1>_T$$

ou :

$$\rightarrow\ <0\bar{1}0>_T + 1/6\ <11\bar{1}>_T$$

Les partielles créées lors de la réaction de type I et II représentent la même faute car elles diffèrent d'une parfaite.

La figure D.1 montre le cisaillement produit lors de l'incorporation sur la macle (112). La faute s'étend à gauche. La partielle est donc celle qui, en glissant vers la droite, provoque le maclage. D'après la convention de signe donnée, c'est $1/6\ <\bar{1}\bar{1}1>_M$. Or :

$$1/6\ <\bar{1}\bar{1}1>_M = 1/6\ <11\bar{1}>_T$$

ce qui montre la propriété annoncée puisque l'incorporation de cette dislocation crée un décalage d'un seul plan (112).

III. — INTERSECTION AVEC UN VECTEUR DE LA FAMILLE C

De même que précédemment, les dislocations vont être ici orientées par le vecteur $<1\bar{1}0>$.

Dans les conditions géométriques de l'intersection représentée sur la figure D.1, la dislocation émissaire de la macle $(11\bar{2})$ est $1/2\ <\bar{1}1\bar{1}>$. L'incorporation de cette dislocation crée un décalage de deux plans (112).

La réaction d'incorporation s'écrit :

$$1/2\ <\bar{1}\bar{1}1>_M \rightarrow 1/2\ <\bar{1}\bar{1}\bar{1}>_T + 2 \times 1/6\ <11\bar{1}>_T$$

$$\rightarrow 1/2\ <00\bar{1}>_T + 1/6\ <\bar{1}\bar{1}1>_T$$

Le cisaillement introduit doit laisser une faute à gauche. Les deux partielles créées sont donc celles qui, en glissant vers la droite, engendrent la macle. Ce sont, comme ci-dessus, les partielles $2 \times 1/6\ <1\bar{1}\bar{1}>_T$.

Nous avons raisonné sur les cisaillements. Nous avons montré que la propriété est vraie pour la famille B et la famille C. Elle est donc universelle. Nous n'aurons donc jamais à nous occuper du signe des partielles laissées à l'incorporation. Elles représentent toujours la bonne faute (ceci reste vrai dans les incorporations mixtes où on ne fait, finalement, que superposer des réactions de type 1).

ANNEXE E

Projection stéréographique de la macle

I. — TRACÉ DE LA PROJECTION STÉRÉOGRAPHIQUE DE LA MACLE

La figure E.1 résume les différentes manières d'engendrer la macle à partir de la matrice. Nous avons vu que les macles mécaniques des matériaux de structure cubique centrée sont composées. On peut les engendrer avec les modes caractéristiques de la première et de la deuxième espèce.

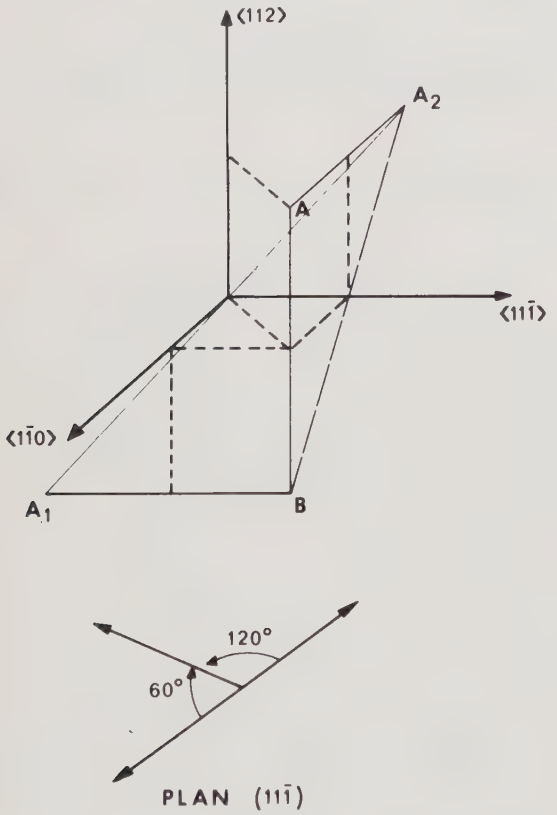


Fig. E.1.

Symétries permettant d'engendrer la macle.

Ainsi, l'une des méthodes est d'effectuer une rotation de 180° autour de $<11\bar{1}>$. Toutes les directions du plan $<11\bar{1}>$ sont donc communes (un plan {111} est conservé dans une rotation de 60° autour de sa normale. La rotation de 180° le conserve donc à fortiori. Voir figure E.1).

La macle (112) et la matrice ont donc en commun toute la zone $<11\bar{1}>$. La zone $<11\bar{1}>$ étant donnée, il y a deux possibilités pour tracer le cristal. Les deux cristaux possibles sont symétriques par rapport au plan $(11\bar{1})$. Ils sont en position de macle l'un par rapport à l'autre (on retrouve ici un des modes de génération des macles de deuxième espèce). La figure E.1 montre comment on peut tracer les pôles $[111]_T$ connaissant les pôles $[111]_M$.

Une conséquence immédiate de cette construction est que toutes les macles d'une même zone [111] ont des orientations cristallographiques identiques. Elles ne diffèrent que par leur plan de maclage.

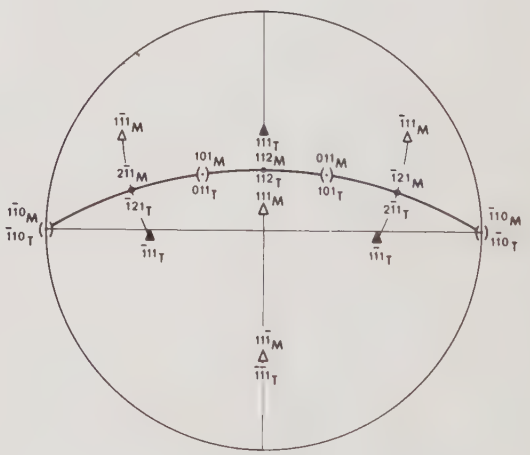


Fig. E.2.

Projections stéréographiques de la matrice et de la macle.

II. — INDEXATION DE LA PROJECTION STÉRÉOGRAPHIQUE DE LA MACLE

Il faut maintenant indexer le cristal maclé de façon cohérente (en particulier en respectant les indices introduits analytiquement).

— La seule direction propre de la transformation analytique est la normale à la macle. Elle conserve son nom.

— Les directions des plans (112) changent seulement de signe quand on les écrit dans la macle.

Nous avons ainsi défini un trièdre qui oriente la macle.

En pratique on peut immédiatement indexer toutes les taches de la zone $<11\bar{1}>$ commune comme indiqué sur la figure E.2 : la macle donne la séquence symétrique de la matrice. On continue alors de proche en proche.

BIBLIOGRAPHIE

1. J. D. Eshelby, F. C. Frank, F. R. N. Nabarro. *Phil. Mag.* (1951), *42,* p. 351.

2. J. Friedel. — Dislocations. Pergamon Press (1964), p. 262.

3. C. S. Zener. — Fracturing of Metals, *A.S.M.* (1948), p. 3.

4. A. N. Stroh. — *Phil. Mag.* (1958), *3,* p. 597.

5. A. H. Cottrell. — *Trans. Met. Soc. A.I.M.E.* (1958), *212,* p. 192.

6. Y. T. Chou, F. Garofalo, R. W. Whitmore. — *Acta Met.* (1960), *8,* p. 480.

7. F. Terasaki. — Thèse, Orsay (1966).

8. E. Smith. — *Acta Met.* (1968), *16,* p. 313.

9. P. J. Worthingon. — *Acta Met.* (1967), *15,* p. 1795.

10. A. R. Rosenfield, G. T. Hahn. — *Acta Met.* (1968), *16,* p. 755.

11. A. R. Rosenfield, M. F. Kanninen. — *Phil. Mag.* (1970), *22,* p. 143.

12. R. Nambar. — *Mém. Sc. Rev. Mét.* (1963), *60,* p. 859.

13. R. W. Cahn, J. A. Coll. — *Acta Met.* (1961), *9,* p. 138.

14. R. W. Cahn. — *Acta Met.* (1953), *1,* p. 49.

15. Y. C. Liu. — *Trans. AIME* (1963), *227,* p. 775.

16. R. E. Reed-Hill. — *Trans. AIME* (1964), *230,* p. 809.

17. A. W. Sleeswyk. — *Acta Met.* (1962), *10,* p. 705.

18. E. Votava, A. W. Sleeswyk. — *Acta Met.* (1962), *10,* p. 965.

19. J. Friedel. — Dislocations. Pergamon Press (1964), p. 187.

20. G. Saada. — Communication personnelle.

21. I. Saxl. — *Czech. J. Phys.* (1967), *B. 17,* p. 586.
— *Idem.* (1968), *B 18,* p. 39.
— *Idem.* (1969), *B 19,* p. 1605.

22. A. W. Sleeswyk, C. A. Verbraak. — *Acta Met.* (1961), *9,* p. 917.

23. A. W. Sleeswyk, J. N. Helle. — *Acta Met.* (1961), *9,* p. 344.

24. P. L. Pratt. — *Acta Met.* (1953), *1,* p. 694.

25. R. E. Reed-Hill, E. R. Buchanan. — *Acta Met.* (1963), *11,* p. 73.

26. N. Thompson, D. J. Millard. — *Phil. Mag.* (1952), *43,* p. 422.

27. D. J. Westlake. — *Acta Met.* (1961), *9*, p. 327.

28. S. Mendelson. — *Mater. Sc. Eng.* (1969), *4*, p. 231; *Scripta Met.* (1970), *4*, p. 5.

29. M. H. Yoo. — *Scripta Met.* (1970), 4, p. 9.

30. M. H. Yoo, C. T. Wei. — *Phil. Mag.* (1966), *14*, p. 573.

31. K. Ishii, H. Kiho. — *J. Phys. Soc. Japan* (1963), *18*, p. 1122.

32. D. I. Tomsett, M. Bevis. — *Phil. Mag.* (1969), *19*, p. 129; *id.* (1969), *19*, p. 533.

33. M. H. Yoo. — *Trans. AIME* (1969), *245*, p. 2051.

34. K. Saito. — *J. Phys. Soc. Japan* (1969), *27*, p. 1234.

35. S. Mahajan, D. E. Barry, B. L. Eyre. — *Phil. Mag.* (1970), *21*, p. 43.

36. D. M. Vallance, M. Bevis. — *Scripta Met.* (1970), *4*, p. 681.

37. A. W. Sleeswyk. — *Acta Met.* (1962), *10*, p. 803.

38. A. W. Sleeswyk. — *Acta Met.* (1964), *12*, p. 669.

39. A. W. Sleeswyk, A. de Geus, J. N. Helle. — *Acta Met.* (1963), *11*, p. 337.

40. R. H. Richman. — Trans. *AIME* (1963), *227*, p. 159.

41. E. N. Pogrebnoy, K. M. Zhak. — *Phys. Metal. Metallograph.* (1967), *23*, p. 161.

42. J. M. Chilton, P. M. Kelly. — *Acta Met.* (1968), *16*, p. 637.

43. P. M. Kelly, G. Pollard. — *Acta Met.* (1969), *17*, p. 1005.

44. G. Krauss, W. P. Pitsch. — *Archiv. Eisenh.* (1964), *35*, p. 667.

45. J. Kounicky. — *Phys. Stat. Sol.* (*a*) (1970), *2*, p. 455.

46. M. Bevis, P. C. Rowlands, A. F. Acton. — *Trans. AIME* (1968), *242*, p. 1555.

47. P. C. Rowlands, E. O. Fearon, M. Bevis. — *Trans. AIME* (1968), *242*, p. 1559.

48. P. C. Rowlands, E. O. Fearon, M. Bevis. — *J. Mater. Sc.* (1970), *5*, p. 769.

49. D. Hull. — *Phil. Mag.* (1958), *3*, p. 1468.

50. W. D. Briggs, P. L. Pratt. — *Acta Met.* (1958), *6*, p. 694.

51. D. Hull. — *Acta Met.* (1960), *8*, p. 11; *id.* (1961), *9*, p. 181.

52. R. Honda. — *J. Phys. Soc. Japan* (1961), *16*, p. 1309.

53. M. J. Marcinkowski, H. A. Lipsett. — *Acta Met.* (1962), *10*, p. 95.

54. D. Hull. — Fracture of solids. Metallurgical Society Conferences Wiley (1962), p. 417.

55. F. Terasaki. — *Acta Met.* (1967), *15*, p. 1057.

56. R. Priestner. W. C. Leslie. — *Phil. Mag.* (1965), *11*, p. 895.

57. R. Priestner, N. Louat. — *Acta Met.* (1963), *11*, p. 195.

58. P. Vagnieux, P. Azou, P. Bastien. — Communication présentée aux Journées d'Automne de la S.F.M. (1970).

59. S. Mahajan. — *Phys. Stat. Sol.* (1969), *33*, p. 291.

60. S. Mahajan. — *Phil. Mag.* (1969), 19, p. 199.

61. S. Mahajan. — *Phys. Stat. Sol.* (*a*) (1970), *2*, 217.

62. S. Mahajan. — *Phys. Stat. Sol.* (*a*) (1970), *2*, p. 187.

63. J. Levasseur. — *Mater. Sc. Eng.* (1969), *4*, p. 343.

64. H. Masuda, S. Hyodo, R. Honda. — *Jap. J. Appl. Phys.* (1967), *6*, p. 1400.

65. T. Takeuchi. — *J. Phys. Soc. Japan* (1966), *21*, p. 2616.

66. C. Loridan. — RE 52, IRSID (1970).

67. T. Takeuchi. — *Trans. J.I.M.* (1966), *7*, p. 1.

68. P. Violan, J. Simon. — *C. R. Acad. Sc.* (1968), *266 A*, p. 632, 937, 1008.

69. G. Nomarski, A. R. Weil. — *Rev. Mét.* (1955), *52*, p. 121.

70. B. J. Thomas. — RE 39 IRSID (1970).

71. D. Hull. — 5e Congrès International de Microscopie Electronique, Philadelphie (1962), B 9.

72. S. W. J. Smith, A. A. Dee, J. Young. — *Proc. Royal Soc., A 121* (1928), p. 477.

73. J. Friedel. — *Dislocations.* Pergamon Press (1964), p. 262.

74. E. Smith. — *Int. J. Fracture Mech.* (1968), *4*, p. 131.

75. J.-P. Hirth, J. Lothe. — Theory of dislocations. Mc Graw-Hill (1968), p. 26.

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

Vu et approuvé :

Orsay, le 24 Janvier 1972

Le Vice-Président du Centre d'Orsay :

ILLISIBLE

Extrait de " Métaux, Corrosion, Industrie "nos 561, mai 1972, 562, juin 1972 et 565, septembre 1972

IMP. DU COMMERCE - ST-GERMAIN-EN-LAYE